

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação de um sistema de digestão em pequena escala

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Daniel Augusto Martins Flório

Dissertação realizada sob a supervisão de
Orientador: Doutor Santino Di Berardino (FCUL / LNEG)
Co-orientador: Eng. Henrique Garrido (RVESOL)

Versão pública

2016

Resumo

Os sistemas de digestão anaeróbia (DA) apresentam-se como uma opção para satisfazer as necessidades energéticas das comunidades rurais. Este trabalho teve como principal objetivo a avaliação de um sistema de digestão em pequena escala. O biodigestor foi instalado, alimentado/inoculado e, de seguida, operado nos diferentes ensaios: arranque, mesofílico de 100 l/dia, mesofílico de 150 l/dia, mesofílico de 150 l/dia com agitação em diferentes intervalos, termofílico e termofílico com perdas noturnas.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a maior produção de biogás foi conseguida no ensaio mesofílico de alimentação de 100 l/dia. O biogás analisado apresentou boa qualidade, com 65 % de CH₄ e 14,3 ppm de H₂S, podendo ser utilizado em dispositivos mais exigentes, como motores geradores. A redução de SV foi de 27 %, o potencial redox medido na saída do biodigestor foi de -194 e a mistura de fermentação apresentou um valor de pH favorável à produção de biogás durante todo o estudo, próximo de 7.

Finalmente são sugeridas medidas de melhoramento do rendimento como, por exemplo, a preparação da mistura de alimentação com 50% de substrato, 20% - 30% de digerido e o restante de água.

Palavras-Chave: DA, biogás, pH, biodigestor.

Abstract

The anaerobic digestion systems are presented as an option to satisfy the energy needs of rural communities. This work had as main objective the evaluation of a small-scale digestion system. The digester has been installed, powered / inoculated and then operated in different trials: starting, 100 l/day mesophilic, 150 l/day mesophilic, 150 l/day mesophilic with stirring at different intervals, thermophilic and thermophilic with night losses.

The results showed that the highest biogas production was achieved in mesophilic test feeding 100 l/day. The biogas analyzed showed good quality, with 65% of CH₄ and 14.3 ppm of H₂S, and may be used in the most demanding devices such as engine generators. The decrease in SV was 27%, the redox potential measured in the digester outlet was -194 and the fermentation mixture showed a pH value favorable to the production of biogas throughout the study, near 7.

At the end it is suggested yield improvement measures as, for example, the preparation of the feed mixture with 50% substrate, 20% - 30% digested, and the remainder water.

Keywords: digestion, biogas, pH, digester.

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	iii
Índice de Tabelas.....	vi
Índice de Figuras.....	vi
Agradecimentos	vii
Simbologia e Notações.....	viii
1. Introdução	10
1.1. Âmbito do projeto	14
1.2. Organização da dissertação	14
2. Digestão Anaeróbia	15
2.1. Processo de DA	17
2.2. Parâmetros que influenciam o processo de DA	23
2.3. Substrato	29
2.3.1. Recolha e transporte do substrato.....	32
2.3.2. Pré tratamento e alimentação	33
2.4. Biodigestores de pequena escala.....	34
2.4.1. Biodigestor de cúpula fixa ou chinês	35
2.4.2. Biodigestor de tambor flutuante ou indiano	37
2.4.3. Biodigestor tubular de polietileno ou de fluxo em pistão.....	38
2.4.4. Biodigestor KUDURA	39
3. Metodologia	40
3.1. Operação e Manutenção	40
3.1.1. Período de arranque	42
3.1.2. Período em regime mesofílico com alimentação de 100 l/dia	42
3.1.3. Período em regime mesofílico com alimentação de 150 l/dia	43
3.1.4. Período em regime mesofílico com agitação de 5 min/3h.....	43
3.1.5. Período em regime mesofílico com agitação de 5 min/12h.....	43
3.1.6. Período em regime termofílico	43
3.1.7. Período de perdas térmicas do biodigestor.....	43
4. Conclusões e Sugestões futuras	44
Bibliografia.....	46

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição teórica de biogás.....	13
Tabela 2 - Combustível equivalente a 1m ³ de biogás para biogás com teor de 60% em CH ₄	14
Tabela 3 - Potencial de redução de microrganismos patogénicos [11]	16
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens da DA [17]	16
Tabela 5 - Reações do processo de DA [33]	23
Tabela 6 - Condições ótimas para o processo de DA [31]	24
Tabela 7 - Gama de temperaturas da DA [31].....	24
Tabela 8 - Micronutrientes essenciais	27
Tabela 9 - Efeitos do NH ₃ na DA [19].....	28
Tabela 10 - Substratos para o processo de DA [55]	29
Tabela 11 - Potencial de produção de biogás [11]	30
Tabela 12 - Produção de biogás a partir de diferentes substratos [61]	32
Tabela 13 - Monitorização e registo pelo autómato	40

Índice de Figuras

Figura 1 - A amarelo está representado o número de milhões de habitantes com falta de eletricidade em cada país [1]	10
Figura 2 - Coleta de lenha em África [6]	12
Figura 3 – Desenvolvimento do processo de produção de biogás numa instalação familiar [9].....	13
Figura 4 - Processo de digestão anaeróbia [17] [18].....	18
Figura 5 - Esquema representativo da etapa de hidrólise [21] e [22] citados por [23]	19
Figura 6 - Esquema representativo da etapa de acidogénese [21] e [22] citados por [23]	20
Figura 7 - Esquema representativo da etapa de acetanogénese [21] e [22] citados por [23]	21
Figura 8 - Esquema representativo da etapa de metanogénese [21] e [22] citados por [23]	22
Figura 9 - Biodigestor de dois estágios [34]	24
Figura 10 - Produção de biogás vs Temperatura (°F) [35].....	25
Figura 11 - Produção de biogás a 60°F (15,5°C) e a 95°F (35°C) [35]	25
Figura 12 - Sistemas de agitação [54].....	29
Figura 13 - Estrume bovino utilizado no biodigestor KUDURA	30
Figura 14 - Classificação do substrato [60].....	31
Figura 15 - Recolha de substrato [63]	33
Figura 16 – Sistema de pré tratamento.....	34
Figura 17 - Esquema de biodigestor de cúpula fixa ou chinês [67].....	36
Figura 18 - Biodigestor de cúpula fixa ou chinês [68]	37
Figura 19 - Esquema de biodigestor de tambor flutuante ou indiano [67].....	37
Figura 20 - Biodigestor de tambor flutuante ou indiano [69]	38
Figura 21 - Biodigestor de fluxo em pistão ou tubular de polietileno [70]	38
Figura 22 - Biodigestor de fluxo em pistão [73]	39
Figura 40 - Coleta do estrume na vacaria.....	41
Figura 41 – Pré tratamento da mistura de alimentação	41

Agradecimentos

Agradecimento incalculável pela ajuda, tranquilidade e motivação que me transmitiram/transmitem no combate ao linfoma:

- Pais, José e Manuela;
- Avó, Mariana;
- Irmã, Filipa e seu marido, Diogo;
- Dr^a Susana Carvalho, Dr^a Paula Braga e a todo o pessoal do IPO que me ajudou/a;
- Madrinha Bela, primas Maria Isabel, Cátia, Cláudia e Sandra, primos Fábio, Tiago e Zeca e restante família que direta ou indiretamente foi fundamental;
- Amigos: João Gradiz, Pedro Fontes, Cíntia Teles, António Morgado, João Eliseu, Joel Martins, João Costa, Margarida Rosa, Vera Matias, Gonçalo Rodrigues, João Silva, António Santos, Jorge Menezes, Ângelo Silva, David Henriques, João Pascoal, David Carmo, Rita Silva;
- A todas as pessoas que diariamente se preocuparam e estiveram presentes, mesmo sem eu saber;

Um agradecimento especial à namorada Jéssica Orquídea por toda a nossa história, pela motivação, pelos cozinhados saborosos, pela partilha de opiniões, pelos passeios, pelo amor, pelo carinho, pela amizade e mais um sem fim de coisas boas.

Agradecimento ao professor Santino Di Berardino pelo conhecimento partilhado, pela ajuda na interpretação dos resultados e pela paciência na correção da escrita em português, sendo uma referência como investigador e como pessoa.

Obrigada ao co-orientador, Henrique, pela ajuda na instalação, operação e manutenção do biodigestor.

Simbologia e Notações

A	Amperes
AC	Corrente alterna
AGV	Ácidos Gordos Voláteis
AOV	Ácidos Orgânicos Voláteis
atm	Atmosfera
C	Carbono
CQO	Carência Química de Oxigénio
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CQO	Carência Química de Oxigénio
DA	Digestão Anaeróbia
DC	Corrente contínua
GEE	Gases com Efeito de Estufa
H ₂	Hidrogénio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfureto de hidrogénio
IEA	Agência Internacional da Energia
Kg	Quilograma
km	Quilómetros
l/dia	Litros por dia
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
m	Metros
mbar	milibar
mm	Milímetros
MO	Matéria Orgânica
MS	Matéria Seca
N ₂	Azoto
NH ₃	Amoníaco
Nm ³	Normal Metro ³
O ₂	Oxigénio
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis

TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
V	Volt
W	Watt
WHO	World Health Organization
°C	Graus Celcius
°F	Graus Fahrenheit
ΔG^0	Energia de Gibbs Padrão

1. Introdução

A pobreza nas comunidades rurais de países em desenvolvimento acontece principalmente devido à falta de acesso a água potável, energia limpa e financiamento. Para saírem da pobreza, estas comunidades e países precisam de ter disponibilidade desses recursos para poderem proporcionar a evolução das suas indústrias, agricultura e os níveis de vida da população. A maioria das famílias destas comunidades rurais usa fontes de energia ineficientes como o querosene para iluminação e a lenha e o carvão para cozinhar. A Agência Internacional de Energia (IEA) disponibilizou um estudo, no qual consta a Figura 1, que revela existirem milhões de pessoas sem acesso a eletricidade em África. Sendo a população presente em África constituída por comunidades rurais, é necessário percorrer grandes distâncias para ter acesso a eletricidade e poder satisfazer as necessidades diárias, como carregar a bateria do telemóvel ou realizar exames médicos.

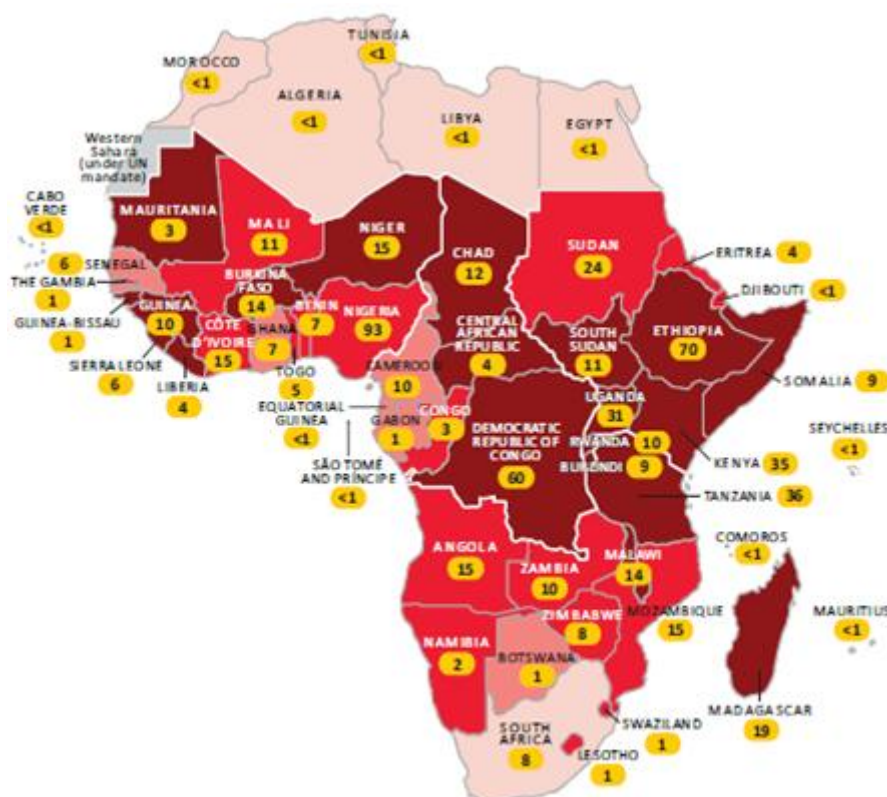


Figura 1 - A amarelo está representado o número de milhões de habitantes com falta de eletricidade em cada país [1]

Estas comunidades produzem colheitas, cujo excedente é vendido em centros de comércio em troca de consumíveis como querosene, açúcar, café e medicamentos (necessários para o tratamento de doenças transmitidas pela água imprópria para consumo), adquiridos com custos elevados. Estas comunidades têm tendência a tornarem-se mais pobres e sem acesso à educação e informação.

A lenha, o carvão e as culturas agrícolas satisfazem as necessidades energéticas destas comunidades. Mas devido à sua combustão ineficiente geram-se gases perigosos que são considerados responsáveis pelo aumento da mortalidade infantil, devido a doenças respiratórias que atacam as crianças, doenças obstrutivas pulmonares crónicas e cancro do pulmão quando é usado carvão. Outras doenças são verificadas entre os adultos. Estima-se que em África, por ano, cerca de 600 000 mortes prematuras sejam devido à poluição do ar doméstico resultante do uso tradicional dos combustíveis sólidos

referidos [2]. Além disso, o consumo de lenha põe em risco muitas espécies arbóreas endêmicas. O aumento da desflorestação dificulta a coleta de lenha e encarece o preço do carvão vegetal. Mwakaje [3] afirma que a distância média percorrida para chegar até às fontes de lenha é cerca de 2,25 km e que por dia as mulheres despendem 3h – 4h na sua coleta. Subedi et al [4] atribuem que 70% da desflorestação observada em 2010 é devida à procura de lenha, prevendo um incremento para 83% em 2030. Estimam que a produção e utilização de biogás em substituição da lenha poderia reduzir o consumo em 6% - 36% em 2010 e 4% - 26% em 2030, o equivalente a 10% - 40% do total da desflorestação em 2010 e 9% - 35% em 2030.

A tecnologia do biogás apresenta-se como opção no combate à desflorestação, fornecendo combustível que substitui diretamente a lenha e o carvão vegetal para cozinhar e pode melhorar a saúde e o bem-estar das comunidades. Baseia-se no processo de digestão anaeróbia (DA) que consiste na transformação de matéria orgânica (MO), na ausência de oxigénio (O_2), em biogás e biofertilizante. Para tal utilizam-se:

- Resíduos da agro-pecuária;
- Lamas de ETAR;
- Culturas;
- Efluentes industriais;
- Entre outras MO.

O resíduo do processo é uma lama orgânica estabilizada, parcialmente higienizada, biofertilizante, que pode ser utilizada para melhorar a produção das culturas, fertilizando o solo. O biogás produzido é uma fonte de energia renovável com possibilidade de diferentes aplicações, como a produção de eletricidade e de calor, a utilização como combustível para veículos e queima para iluminação. A DA, quando aplicada a resíduos, permite a redução do consumo de combustíveis fósseis, de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e reduz a disseminação de microorganismos e de doenças. É uma tecnologia composta basicamente por um biodigestor, um sistema de purificação de biogás e um saco para armazenamento do combustível. Está bastante desenvolvida e adequa-se às capacidades técnicas (operação e manutenção) e económicas dos agricultores dos países em desenvolvimento. No entanto, ainda é vista com desconfiança devido a algumas restrições, nomeadamente o tipo e quantidade de matéria-prima disponível para alimentar o sistema, a disponibilidade de água para cobrir o consumo, a dificuldade de assegurar a construção e a manutenção no local e o acesso a financiamento para cobrir os custos de investimento, que são relativamente altos. Segundo as projeções referidas pela IEA [1], em 2040, mais do que 6 milhões de famílias rurais na África Subsaariana produzirão biogás, sendo que mais de metade residirão na África Oriental.

Uma instalação de biogás pode constituir a componente central de uma comunidade holística, fornecendo energia para uso doméstico degradando matérias biodegradáveis e produzindo fertilizante orgânico que pode providenciar nutrientes (N e P) em estado químico adequado para uma melhor produção de culturas agrícolas. Uma instalação de biogás utilizada para a produção de energia limpa, melhora a qualidade do ar dentro das habitações e reduz o tempo de coleta da lenha ou a compra de carvão vegetal. Esta situação facilita o trabalho da mulher da casa evitando gastar muitas horas na coleta da lenha. Mas, em contrapartida, requer trabalho adicional na preparação do substrato de alimentação do biodigestor [5]. O ganho de tempo pode ser significativo, uma vez que o processo de coleta de lenha é muito demorado, como mostra a Figura 2.



Figura 2 - Coleta de lenha em África [6]

Em suma, de acordo com a WHO [2], Tchobanoglous et al [7] e Katawal e Bohara [8], os biodigestores de pequena escala são conhecidos mundialmente por fornecerem um variado leque de soluções para os países em desenvolvimento, nomeadamente:

1. Melhorar a qualidade do ar dentro de casa e, conseqüentemente, diminuir os problemas crónicos de saúde;
2. Proporcionar combustível para cozinhar e para iluminação;
3. Reduzir a desflorestação;
4. Efetuar o tratamento dos resíduos animais;
5. Dispensar o uso de fertilizantes inorgânicos;
6. Reduzir os GEE libertados para a atmosfera;
7. Proporcionará iluminação ou o aquecimento, nos casos específicos em que for instalado um gerador de eletricidade, alimentado com o biogás produzido.

A Figura 3 mostra o desenvolvimento do processo de produção de biogás desde o substrato aos produtos finais, com exemplos de utilização.

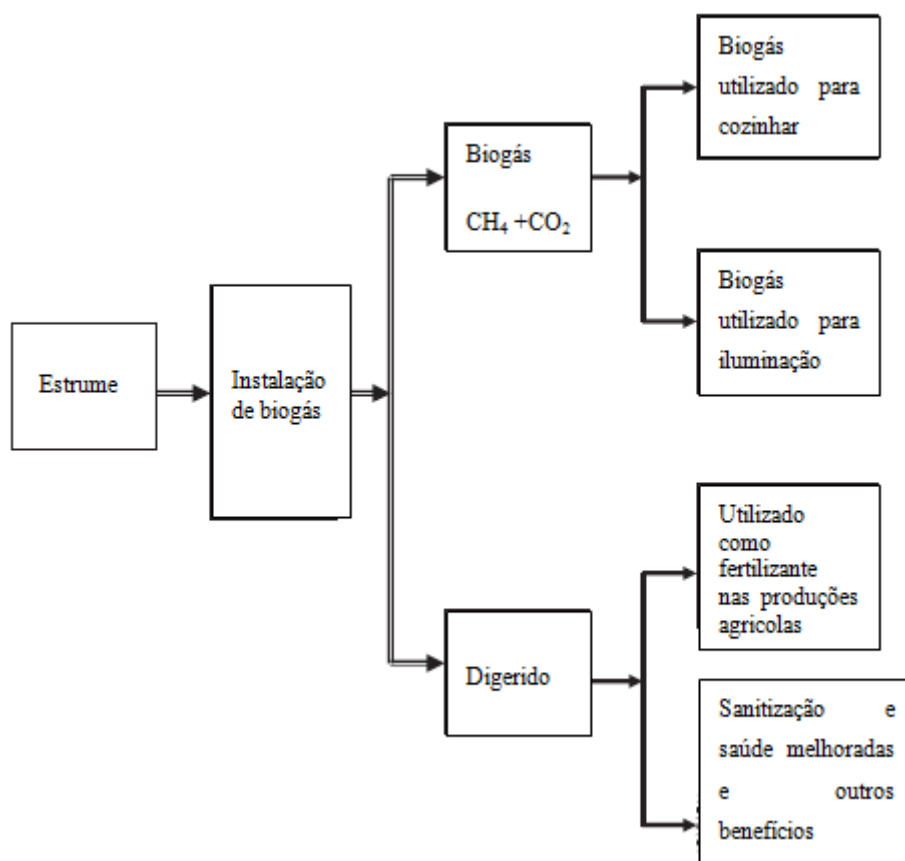


Figura 3 – Desenvolvimento do processo de produção de biogás numa instalação familiar [9]

O biogás é produzido pelas bactérias metanogénicas presentes no processo de DA através da degradação da MO. Sendo composto por uma mistura de vários gases em diferentes percentagens [10], conforme descrito na Tabela 1:

<u>Composto</u>	<u>Percentagem</u>
CH ₄	55 – 70 %
CO ₂	35 – 40 %
H ₂ , H ₂ S, N, CO, NH ₃ , H ₂ O	0,1 – 5 %

Tabela 1 - Composição teórica de biogás

A composição do biogás depende do tipo e qualidade do substrato e da carga orgânica e tempo de retenção do biodigestor. O poder calorífico do biogás varia linearmente com o seu teor em CH₄, sendo 4700 kcal/m³ – 6000kcal/m³, para uma composição de 55 % – 70 % de CH₄. Na Tabela 2 consta a comparação da equivalência de 1 m³ de biogás com 60 % de CH₄ quando comparado a outros combustíveis [11]:

<u>Combustível</u>	<u>Equivalente</u>
Gasolina	0,61 l

Querosene	0,58 l
Diesel	0,55 l
Lenha	1,5 kg

Tabela 2 - Combustível equivalente a 1m³ de biogás para biogás com teor de 60% em CH₄

Um m³ de biogás com composição de 65 % de CH₄, tem um poder energético de 6 kWh – 6,5 kWh [12], que pode ser convertido em 2 kWh – 2,5 kWh de eletricidade, tendo em conta o rendimento do motor.

Uma família de 5 pessoas necessita de 1500 l/dia – 2400 l/dia de biogás para satisfazer as necessidades, cozinhando duas refeições por dia [13].

1.1. Âmbito do projeto

Este trabalho tem como objetivos:

- Caracterizar o desempenho do biodigestor KUDURA em função da temperatura;
- Identificar a composição e as propriedades do substrato utilizado (afluente) e do digerido (efluente) através de análises químicas;
- Avaliar a quantidade e qualidade do biogás produzido;
- Avaliar o desempenho do biodigestor e sugerir medidas para o aumento de rendimento e produção.

A parte experimental do projeto consiste em operar e monitorizar um biodigestor de pequena escala que faz parte do sistema KUDURA, uma solução sustentável de desenvolvimento rural desenvolvida pela RVE.SOL, sendo esta uma empresa que fornece tecnologias sustentáveis aos países em desenvolvimento, impulsionando a mudança de vida dos clientes e procurando exercer um impacto positivo no ambiente em que opera.

1.2. Organização da dissertação

A dissertação começa com um capítulo introdutório, capítulo 1, que descreve a situação social e energética nos países em desenvolvimento, área do planeta em que o biodigestor estudado se poderá aplicar.

O capítulo 2 descreve os processos e tecnologias utilizadas no contexto rural, dando particular relevo aos sistemas de pequena escala. Neste capítulo também são apresentados os vários parâmetros que influenciam o processo de DA e caracterizados os principais substratos de uso corrente na produção de biogás, em particular o estrume de vaca que é o substrato utilizado neste estudo. São também abordados os vários biodigestores utilizados na pequena escala, dando ênfase ao biodigestor KUDURA.

O capítulo 3 descreve a metodologia, o método de operação e os procedimentos utilizados para a monitorização do sistema.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos, procede-se à sua análise e discussão e retiram-se conclusões.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas no capítulo anterior e sugerem-se medidas consistentes ao aumento do rendimento do biodigestor, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. Digestão Anaeróbia

Alessandro Volta (1745-1827) descobriu, em 1776, que o CH_4 se obtinha de sedimentos acumulados em fundos de lagos, por um processo biológico.

Em 1856, Reiset observou que o CH_4 também se formava em estrumeiras e sugeriu que era necessário estudar o material depositado para poder explicar o processo de decomposição anaeróbia.

Em 1890, Van Senus concluiu que o processo anaeróbio era realizado por vários microrganismos. No mesmo ano foi construído o primeiro biodigestor à escala real na Índia. Omeliansky isolou organismos que produziam hidrogénio (H_2), ácido acético (CH_3COOH) e ácido butanoico ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$) a partir da celulose e concluiu que havia produção de CH_4 a partir da redução do CO_2 pelo H_2 , deduzindo então a existência de bactérias metanogénicas em 1904 [14] citado em [15].

Decorria o ano de 1896 em Exeter, Inglaterra, quando as lâmpadas de iluminação pública começaram a ser alimentadas com biogás produzido pelo esgoto da cidade [16], tratado em grandes fossas sépticas.

Em 1916, Imhoff denominou as fases do processo de DA em digestão ácida e digestão metânica.

Durante a segunda guerra mundial, com a necessidade por combustíveis, começaram a expandir-se os biodigestores a nível rural, tanto na Europa como na China e na Índia. Reduzindo-se logo a seguir, dada a disponibilidade de combustíveis fósseis a baixo custo.

O processo passou a ter novo interesse em 1974, devido à primeira crise do petróleo, que alertou para a necessidade de produzir combustíveis alternativos e renováveis.

A partir dessa altura adquiriu-se melhor compreensão e conhecimento das fases mais sensíveis do processo microbiológico e bioquímico da DA e esta tecnologia tornou-se cada vez mais fiável e aceite, e o biogás tornou-se um combustível interessante. Por exemplo, a cidade de Santiago do Chile aproveitou os avanços no tratamento da purificação do biogás para inserir uma parte significativa deste combustível na rede de distribuição de gás natural urbana.

Hoje em dia, a Alemanha é um dos países que mais tem apostado na instalação de biodigestores, principalmente a nível de efluentes e resíduos industriais, agrícolas e urbanos, tornando-se uma fonte de rendimento para as empresas e diminuindo a dependência energética do gás natural. Este setor representa também uma fonte de exportação de tecnologia para todo o mundo, abrangendo quer os biodigestores quer os equipamentos para a conversão ou purificação de biogás.

A DA ocorre de forma natural em locais ao abrigo do O_2 , por exemplo em aterros de RSU, havendo emissão de CH_4 e de CO_2 para a atmosfera, contribuindo para o efeito de estufa. A recolha e utilização deste gás em substituição de um combustível fóssil é uma solução essencial.

No plano sanitário a DA cria condições desfavoráveis para a sobrevivência dos microrganismos patogénicos.

Na Tabela 3 estão apresentados os potenciais de redução de microrganismos patogénicos através da DA.

Organismos	Temperatura (°C)	Tempo de digestão (Dias)	Destruidos (%)
Poliovirus	35	2	98,5
Salmonella spp	2 a 37	6 a 20	82-98
Salmonella typhosa	22 a 37	6	99
Mycobacterium	30		100
Ascaris	29	15	90
Cistos de parasitos	30	10	100

Tabela 3 - Potencial de redução de microrganismos patogênicos [11]

É vantajoso manter uma grande quantidade de bactérias ativas durante o processo de DA [17] para que haja uma degradação significativa da MO com elevada produção de biogás.

Apesar de os sistemas de DA terem muitas vantagens relativamente aos sistemas aeróbios, como a remoção mais eficaz de microrganismos patogênicos ou a redução dos odores, também apresentam desvantagens, o que os torna por vezes limitados em determinadas situações como por exemplo a sensibilidade a substâncias tóxicas, o arranque lento do processo. Verifica-se também a existência de inibição sócio-cultural, em determinados países de África, onde as populações de pequenas comunidades não aceitam a ideia de “trabalhar” com estrume animal nem humano, dadas as crenças religiosas. Na Tabela 4 está apresentada uma lista de vantagens e desvantagens do processo e dos sistemas de DA.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • baixa produção de sólidos; • baixo consumo de energia; • baixa demanda de área; • baixos custos de implantação; • produção de metano; • possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; • tolerância a elevadas cargas orgânicas; • aplicabilidade em pequena e grande escala; • baixo consumo de nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • as bactérias anaeróbias são suscetíveis à inibição por um grande número de compostos; • a partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semente adaptado; • alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária; • a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; • possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; • possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; • remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens da DA [17]

Em suma, a DA apresenta, de forma geral, vantagens significativas para o tratamento de resíduos biodegradáveis, sendo um fator determinante para o sucesso do sistema o método de operação e controlo.

2.1. Processo de DA

O processo de DA ocorre de forma natural dentro dos biodigestores em ausência de O_2 . É um processo complexo em termos da sua microbiologia, pois é constituído por diferentes reações biológicas sequenciais, realizadas pela atividade de uma população bacteriana específica. A transformação de MO em CH_4 e CO_2 depende do desenvolvimento equilibrado das diferentes populações de microrganismos e enzimas, que atuam em regime de sintropia e sinergia para manter o equilíbrio metabólico entre todos os intervenientes e o processo global da DA seja estável.

Tradicionalmente considerava-se que o processo de DA era constituído por quatro fases, interligadas entre si, nomeadamente:

1. Hidrólise da matéria grosseira em suspensão em monómeros (açúcares e aminoácidos);
2. Acidogénese dos monómeros produzidos na hidrólise em ácidos gordos voláteis (AGV) e álcoois;
3. Acetogénese que converte os AGV produzidos na acidogénese em acetato e H_2 ou formato. Acontece em sintrofia com as bactérias metanogénicas, as quais produzem CH_4 através do formato e do H_2 ;
4. Metanogénese produz CH_4 através do H_2 , do formato e do acetato.

Mais recentemente, o processo de DA foi resumido em 6 passos, conforme a Figura 4, que apresenta um esquema global das diferentes fases do processo de DA e dos diferentes grupos de microrganismos presentes no processo.

- 1) Hidrólise de carboidratos, proteínas e lípidos;
- 2) Fermentação de açúcares, aminoácidos e peptídios;
- 3) Oxidação anaeróbia de AGV e álcoois;
- 4) Conversão de CO_2 e H_2 em acetato;
- 5) Conversão de H_2 , CO_2 e acetato em H_2S e CO_2 ;
- 6) Conversão de H_2 , CO_2 e acetato em CH_4 e CO_2 ;

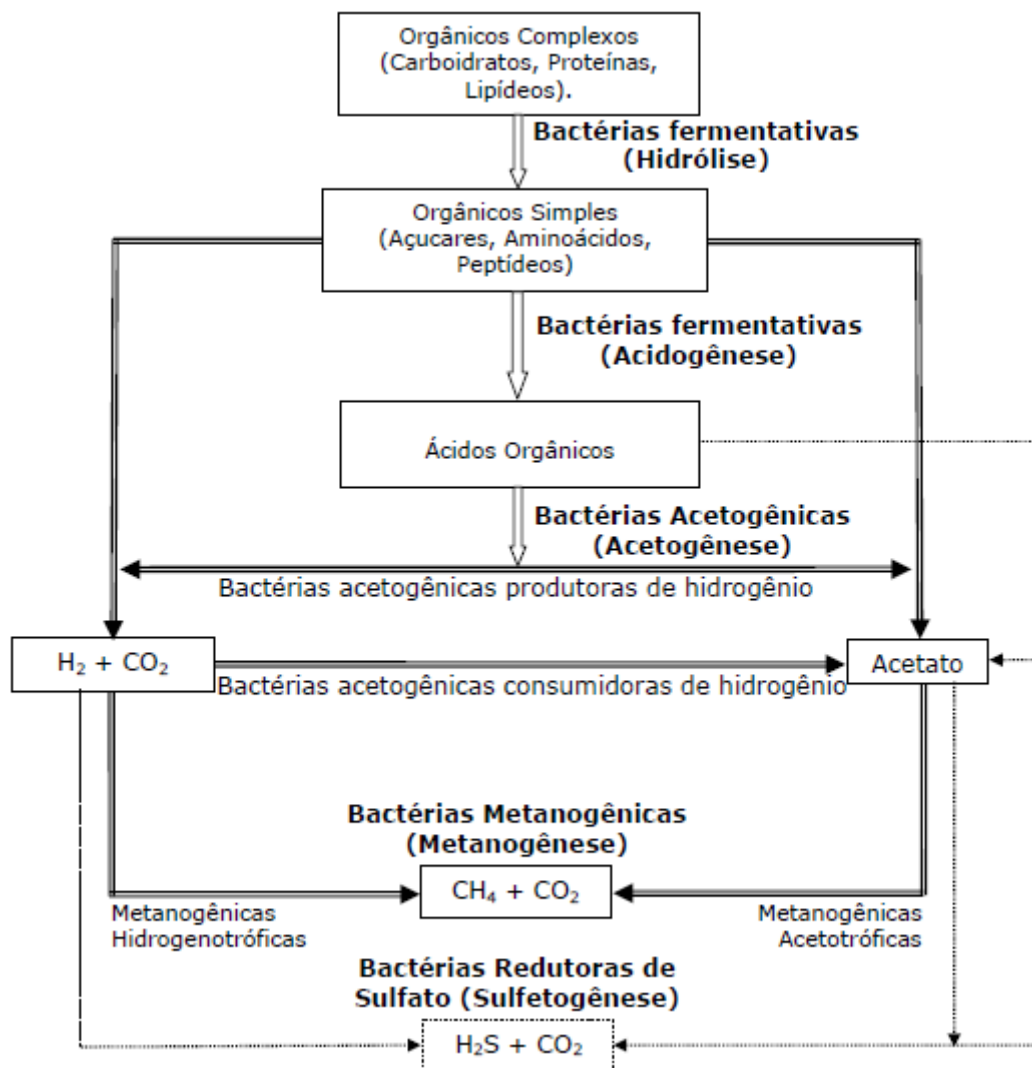


Figura 4 - Processo de digestão anaeróbia [17] [18]

As bactérias metanogênicas, em particular as bactérias acetoclásticas, são microrganismos muito sensíveis às condições do ambiente em que se encontram, apresentam o crescimento mais lento de toda a comunidade do consórcio bacteriano da DA, sendo o grupo mais vulnerável do processo [12] [19].

Cerca de 90 % da MO disponível num biodigestor transforma-se em CH₄ e noutros gases por oxidação direta e cerca de 10 % é consumida pelos microrganismos ao efetuarem a degradação da MO e a sua reprodução [20].

Hidrólise

Os substratos contendo MO grosseira são mais difíceis de degradar, sendo necessário reduzir o seu tamanho e dissolvê-los em água. Assim, a hidrólise é a primeira fase do processo de DA, pelo que é muito importante que decorra com normalidade para poder tornar disponível a parte da MO presente em forma insolúvel no substrato. Uma baixa taxa de hidrólise limita a eficiência de produção de CH₄.

A hidrólise efetua a conversão da matéria grosseira em suspensão em compostos mais pequenos: açúcares, aminoácidos e gorduras simples. Alguns substratos possuem compostos que são difíceis de

hidrolisar, aplicando-se, por vezes, pré tratamentos químicos, térmicos, enzimáticos ou mistos para melhorar o desempenho.

Os microrganismos responsáveis pela fase da hidrólise são as bactérias hidrolíticas que libertam exoenzimas (celulases, amilases, proteases e lipases) que reduzem a dimensão da matéria, possibilitando que seja utilizada pelas bactérias fermentativas da acidogénese.

A Figura 5 mostra os substratos e os produtos que se obtêm após a ação das bactérias hidrolíticas. Basicamente, na hidrólise, as grandes moléculas (proteínas, glícidos, lípidos e ácidos nucleicos) são convertidos nos seus respetivos monómeros.

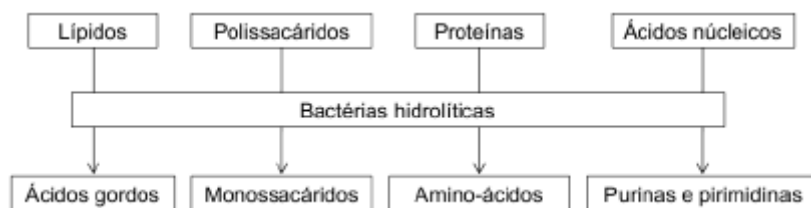


Figura 5 - Esquema representativo da etapa de hidrólise [21] e [22] citados por [23]

Enquanto a hidrólise dos glícidos demora apenas algumas horas, a hidrólise das proteínas e dos lípidos pode demorar dias. Os compostos lenhocelulósicos e a lenhina, por exemplo, são degradados de forma lenta e incompleta [12]. Para um substrato contendo compostos mediantemente biodegradáveis, o processo global de hidrólise demora cerca de 2 a 3 dias [24]. Se houver acumulação dos produtos da hidrólise, a produção e atividade das enzimas pode sofrer inibição [25], originando consequentemente a redução da atividade metanogénica e a remoção da MO.

Para Moreno [20] a hidrólise depende de vários fatores:

- Temperatura do processo de DA;
- Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) que se expressa pela relação: $TRH = \frac{V}{Q}$ e deve ser superior ao tempo de duplicação das bactérias metanogénicas, para garantir a degradação da MO;
- Composição bioquímica do substrato;
- Tamanho das partículas;
- pH;
- Concentração de NH_4^+ e dos produtos da hidrólise.

A hidrólise é habitualmente considerada como sendo a etapa limitante de todo o processo anaeróbio, quando o substrato contém sobretudo matéria em suspensão, determinando a eficiência de conversão do substrato em biogás. Abaixo dos 20 °C, a hidrólise processa-se com maior dificuldade, sendo um importante fator limitante do processo [26] citado em [15] por [27].

Acidogénese

A seguir à hidrólise o material orgânico solúvel no biodigestor é convertido em ácidos orgânicos voláteis (AOV) através da acidogénese, que utiliza os produtos da hidrólise como substrato. As bactérias acidogénicas fermentativas transformam os monómeros em substâncias orgânicas mais simples como

AGV de cadeia curta (por exemplo ácido acético, fórmico, láctico, butírico e etanol) e libertam compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S , entre outros), como mostra a Figura 6.

Nesta fase, as bactérias são maioritariamente anaeróbias restritas, existindo também algumas espécies facultativas que processam o material por forma oxidativa [28] e removem todo o O_2 presente no substrato em fermentação.

Através da desnitrificação, o nitrato, quando presente no substrato, pode ser usado como agente oxidante, sendo reduzido a azoto amoniacal, um produto alcalino que ajuda ao controlo do pH do processo. De uma forma semelhante, o sulfato existente é reduzido a H_2S pelas bactérias redutoras de sulfatos, sendo uma reação indesejável por dois motivos: o sulfato utiliza uma parte da MO que deixa de estar disponível para ser transformada em CH_4 e no processo forma-se H_2S , que é um composto corrosivo, que confere um odor muito desagradável, tanto à fase líquida como ao biogás, além de poder ser tóxico para o processo de metanogénese, afetando a continuação do processo de DA [17].

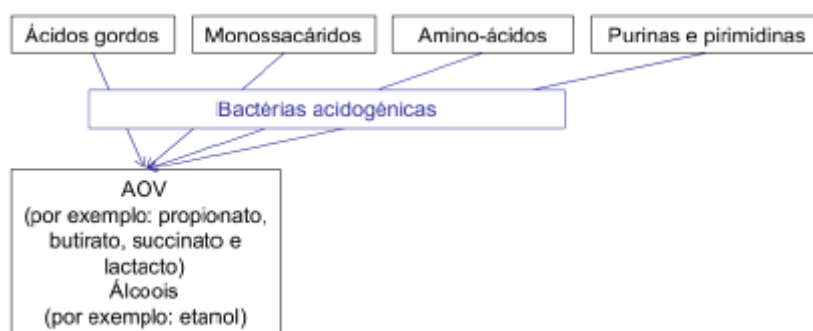


Figura 6 - Esquema representativo da etapa de acidogénese [21] e [22] citados por [23]

Acetogénese

A acetogénese é a penúltima fase do processo de DA, na qual os ácidos gordos e o etanol sofrem uma transformação pela ação das bactérias acetogénicas, havendo formação de acetato, formato, metanol, CO_2 e H_2 , que são os substratos exclusivamente utilizados pela metanogénese. As bactérias responsáveis pela produção de H_2 são as bactérias sintróficas, enquanto as bactérias homoacetogénicas são as produtoras dos outros compostos. Estes microrganismos, ao contrário das bactérias acetogénicas, não produzem H_2 mas consomem-no, o que permite manter reduzido o teor em H_2 na fermentação. A homoacetogénese provoca a redução de CO_2 a ácido acético pelo H_2 [29] citado por [17].

A fase acetogénica é essencial para que a metanogénese se processe de uma forma correta, pois proporciona os compostos essenciais para o metabolismo das bactérias metanogénicas, ao mesmo tempo que contribui para controlar um teor de H_2 e consequentemente manter as condições redutoras do meio. A acumulação de acetato pode inibir as bactérias acetogénicas, levando ao possível acumular de AGV [30].

A Figura 7 mostra os substratos das bactérias presentes nesta fase e os produtos resultantes.

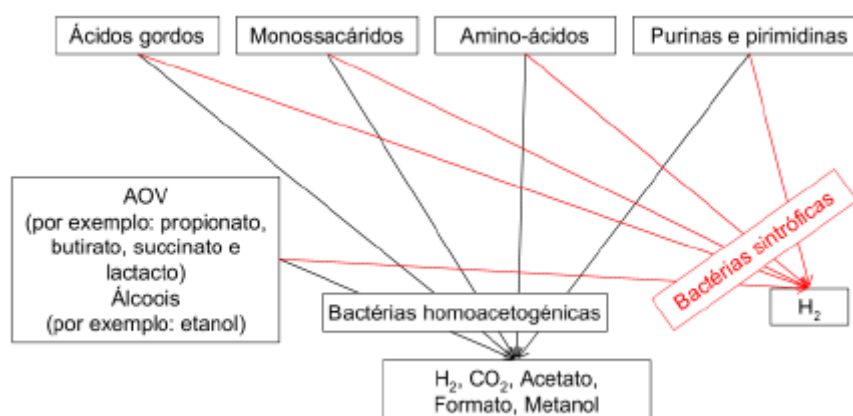


Figura 7 - Esquema representativo da etapa de acetanogénese [21] e [22] citados por [23]

Metanogénese

A metanogénese é a última fase do processo de DA e depende do bom funcionamento das fases anteriores para a produção de biogás. As pequenas moléculas formadas pela acetogénese, como o acetato, formato, metanol, H_2 , e CO_2 são suscetíveis de ser utilizadas por estirpes de bactérias metanogénicas que os convertem em CH_4 , CO_2 e outros gases em quantidades reduzidas.

As bactérias específicas da metanogénese que produzem CH_4 e CO_2 reduzindo ácido acético são definidas utilizadoras do acetato (acetoclásticas). As que produzem CH_4 e H_2O reduzindo CO_2 são definidas utilizadoras de H_2 (hidrogenoclásticas). Os microrganismos metanogénicos constituem a etapa fundamental do processo anaeróbio metanogénico devido a serem os responsáveis pela formação de CH_4 e pela eliminação da média dos produtos produzidos nas fases anteriores. As bactérias hidrogenoclásticas crescem mais rápido que as acetoclásticas, que constituem a comunidade mais débil do processo, podendo afetar o seu funcionamento caso não consigam metabolizar o acetato e assim controlar o pH do meio [17].

Se a taxa de remoção do ácido acético operada pelas bactérias acetoclásticas não for idêntica ou superior à taxa de produção desse ácido, ocorre a sua acumulação e a diminuição do pH com consequente instabilidade e inibição do processo. Assim, quando ocorre alguma redução na atividade metanogénica e/ou aumento da produção líquida de ácidos, ocorre a acidificação do biodigestor, uma das falhas operacionais mais comuns em tratamentos anaeróbios [27].

Por outro lado, é fundamental que o H_2 seja utilizado pelas bactérias hidrogenotróficas para estimular a atividade das bactérias sintróficas produtoras de H_2 e manter ativa a acetogénese [31].

A Figura 8 mostra o esquema da fase de metanogénese, na qual têm lugar as reações abaixo [21] [22] [32]:



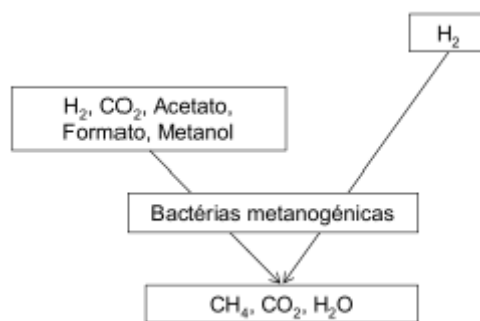


Figura 8 - Esquema representativo da etapa de metanogénese [21] e [22] citados por [23]

Em suma, a metanogénese é perturbada significativamente por algumas condições de operação do biodigestor, por exemplo a temperatura, o volume de alimentação e o tipo de substrato alimentado.

Espontaneidade das reações do processo de DA

A espontaneidade de uma reação é a forma natural com que essa mesma reação ocorre e pode ser avaliada através da variação da energia de Gibbs padrão (ΔG^0), (298 K, pH=7 e 1 atm). Quanto menor for o valor de ΔG^0 , mais espontânea é a reação, sendo a dedução possível através da seguinte equação [15]:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R * T * \ln \left(\frac{[produtos]}{[reagentes]} \right)$$

, onde:

- ΔG : Variação de energia de Gibbs (J);
- ΔG^0 : Variação de energia de Gibbs padrão (J);
- R : Constante dos gases (8,316 J.mol⁻¹.K⁻¹);
- T : Temperatura em kelvins (K);
- $[Produtos]$: Concentração dos produtos da reação;
- $[Reagentes]$: Concentração dos reagentes da reação.

A Tabela 5 mostra as reações mais importantes do processo de DA e as respectivas ΔG^0 em condições padrão.

Etapas	Substratos	Produtos	ΔG^0 (KJ)
Acidogênese	$C_6H_{12}O_6 + 4H_2O \longrightarrow$	$2CH_3COO^- + 2HCO_3^- + 4H^+ + 4H_2$	-207
	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow$	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$	-135
	$3 C_6H_{12}O_6 \longrightarrow$	$4CH_3CH_2COO^- + 2CH_3COO^- + 2CO_2 +$	-922
		$+ 2H_2O + 2H^+ + H_2$	
Acetogênese	$CH_3CH_2OH + H_2O \longrightarrow$	$CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+10
	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \longrightarrow$	$CH_3COO^- + H^+ + 3H_2 + HCO_3^-$	+76
	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \longrightarrow$	$2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+48
	$2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \longrightarrow$	$CH_3COO^- + 4H_2O$	-105
Metanogênese	$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow$	$CH_4 + 2H_2O$	-130
	$4HCOO^- + 4H^+ \longrightarrow$	$CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$	-120
	$4CO + 2H_2O \longrightarrow$	$CH_4 + 3CO_2$	-186
	$CH_3COO^- + H^+ \longrightarrow$	$CH_4 + CO_2$	-33
	$4CH_3OH \longrightarrow$	$3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	-309
	$4CH_3CH_2CH_2NH^+ + 6H_2O \longrightarrow$	$9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_4^+$	-666
Desnitrificação	$12NO_3^- + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow$	$12NO_2^- + 6CO_2 + 6H_2O$	-1946
	$8NO_2^- + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow$	$4N_2O + 6CO_2 + 6H_2O$	-632
	$12N_2O + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow$	$12N_2 + 6CO_2 + 6H_2O$	-134
Redução de Sulfato	$4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow$	$4H_2O + HS^-$	-152
	$CH_3COO^- + SO_4^{2-} \longrightarrow$	$2HCO_3^- + HS^-$	-48
	$4CH_3CH_2COO^- + 3SO_4^{2-} \longrightarrow$	$4CH_3COO^- + 4HCO_3^- + H^+$	-151

Tabela 5 - Reações do processo de DA [33]

Concluindo o capítulo do processo de DA, é imprescindível que o acetato e o H_2 sejam utilizados como precursores diretos de CH_4 . Se essa conversão não acontecer, não ocorrerá a fase de metanogênese, acumulando produtos da fase de hidrólise e fermentação no biodigestor.

2.2. Parâmetros que influenciam o processo de DA

As diferentes fases do processo de DA requerem condições ambientais específicas para os seus microrganismos, sendo difícil manter todas as fases em condições ótimas. A Tabela 6 indica os valores ótimos dos parâmetros para o processo de DA. Nos sistemas de digestão convencional é corrente assegurar as melhores condições para a fase metanogênese, devido a ser a mais sensível e, portanto, a fase limitante do processo. Por outro lado, nos efluentes com matéria em suspensão de difícil degradabilidade, a hidrólise e a acidogênese são as etapas com maior dificuldade de processamento, sendo preferível a construção de um biodigestor de 2 estágios com uma fase de hidrólise/acidogênese separada da fase acetogênese/metanogênese, como apresentado na Figura 9.

Parâmetro	Hidrólise/Acidogénese	Acetogénese/Metanogénese
Temperatura	25-35°C	Mesofílica: 32-42°C Termofílica: 50-58°C
pH	5.2-6.3	6.7-7.5
Razão C:N	10-45	20-30
Potencial Redox	+400 a -300mV	<-250mV
Razão C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Nutrientes	-	Ni, Co, Mo, Se

Tabela 6 - Condições ótimas para o processo de DA [31]



Figura 9 - Biodigestor de dois estágios [34]

Os principais parâmetros que podem ter influência no processo de DA são apresentados na Tabela 6 e explicados abaixo em maior detalhe:

- **Temperatura**

A temperatura de operação de um biodigestor tem influência direta na velocidade de ação e crescimento das bactérias, na produção de biogás, na duração do arranque, na solubilidade dos compostos e na capacidade de resposta a variações na carga de afluente [31], enquadrando-se em 3 gamas, apresentadas na Tabela 7.

Gama de temperaturas	Intervalo (°C)
Psicrófila	15-25
Mesófila	30-40
Termófila	50-60

Tabela 7 - Gama de temperaturas da DA [31]

A gama psicrófila é muito pouco utilizada, pois a produção de biogás obténível é relativamente reduzida quando comparada com as outras gamas.

Na digestão mesofílica, o biodigestor é aquecido e a matéria-prima permanece no seu interior entre 15 e 30 dias, aproximadamente. Este tipo de processo tende a ser mais tolerante no controlo da

temperatura e alimentação que o processo termofílico, mas a produção de biogás é menor, como mostra a Figura 10, que apresenta a capacidade de produção de biogás de um biodigestor operado em contínuo a várias temperaturas (Fahrenheit – °F).

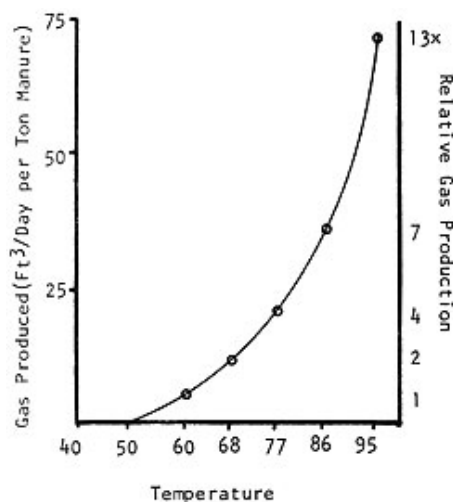


Figura 10 - Produção de biogás vs Temperatura (°F) [35]

Na gama termofílica o biodigestor é aquecido a temperatura mais elevada. Este processo proporciona uma maior produção de CH_4 , um processamento mais rápido, o TRH é inferior, 10 – 15 dias, aproximadamente, e uma melhor eliminação de organismos patogénicos.

A Figura 11 representa a produção de biogás num biodigestor operado a 15,5 °C e outro a 35 °C, em função do TRH.

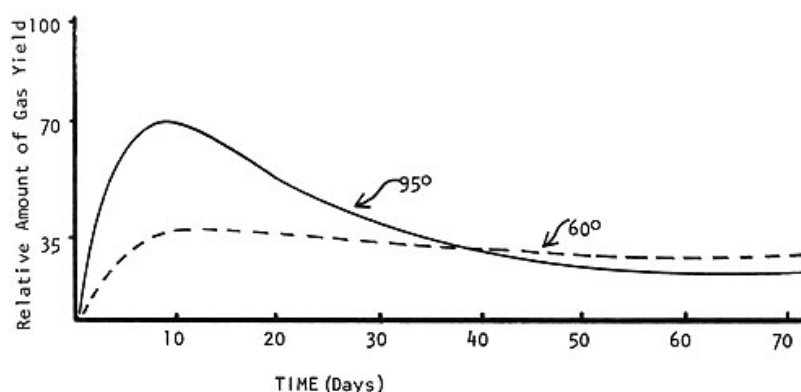


Figura 11 - Produção de biogás a 60°F (15,5°C) e a 95°F (35°C) [35]

Os microrganismos metanogénicos que pertencem à gama mesofílica são numerosos, mas a disponibilidade de bactérias metanogénicas que operam na gama termofílica é mais limitada, sendo ainda mais sensíveis à temperatura. Variações de 2 °C originam perdas superiores a 30 % na produção de biogás [12], o que requer tecnologia eficaz, maior fornecimento de energia para o aquecimento e um controlo e monitorização rigorosos do aquecimento [36].

Vantagens da gama termofílica:

- Produção de biogás mais elevada;
- Maior poder de eliminação de microrganismos patogénicos [37];
- Maior taxa de degradação de MO;
- Menor TRH que as gamas psicrofílica e mesofílica [38] [39] [40];
- Fácil separação sólido/líquido do resíduo digerido.

Barreiras da gama termofílica:

- Processo mais sensível a variações na alimentação e na temperatura [37] [40];
- Maior necessidade energética e maior sistema de aquecimento para manter a temperatura;
- Maior sensibilidade à inibição por amónia [41].

A partir de 65 °C – 70 °C, a produção de biogás começa a baixar, começando os microrganismos a morrer [42]. Variações significativas na temperatura podem prejudicar a cadeia de reações e serem necessários alguns dias para que o sistema recupere o equilíbrio [31].

A temperatura de operação mais utilizada nos biodigestores é 35 °C - 37 °C [37], sendo que nos últimos anos a tendência é utilizar a gama termofílica, sobretudo com efluentes muito concentrados.

- **Nutrientes**

Todos os microrganismos precisam de nutrientes para o seu crescimento, o que faz com que o tipo de substrato possa ter influência no desempenho do biodigestor.

O carbono (C) é a principal fonte de energia para as bactérias. Azoto (N), fósforo (P) e enxofre (S) são considerados macronutrientes essenciais ao processo de DA.

Concentrações elevadas em P não prejudicam o processo de DA que, no entanto, sofre inibição na sua ausência.

O N é um estimulador do crescimento das bactérias presentes na DA e, se a sua concentração for inferior ao necessário para assegurar o crescimento, ocorre a diminuição do número de bactérias, demorando mais tempo a consumir o C disponível, prejudicando o processo.

Os substratos com uma proporção de C/N muito baixa promovem a produção de amónia que pode provocar inibição do processo. Uma relação de C/N demasiado elevada pode revelar deficiência em N, diminuindo a taxa de crescimento das bactérias. Palhas e urina, componentes muito comuns do estrume animal, apresentam elevados teores de C e N, respetivamente, devendo ser controlada a sua introdução no biodigestor [43] [41]. Para o desenvolvimento regular do processo, [44] sugere que a razão C:N:P de 300:5:1, pode ser suficiente, enquanto Khalid et al [45] sugerem uma razão de 120:3:1.

A quantidade de S presente no substrato deve ser limitada de forma a evitar um forte desenvolvimento das bactérias redutoras de sulfato e, conseqüentemente, a formação de H₂S [31]. A presença de concentrações elevadas de H₂S pode provocar a inibição da atividade bacteriana [31].

Segundo o Doutor Santino Di Berardino [44], um sistema anaeróbio estável requer micronutrientes essenciais, os quais se apresentam na Tabela 8 com as respetivas concentrações.

Micronutrientes essenciais	Concentração ótima (g/m ³)
Ferro	0,2
Cálcio	0,03
Níquel	0,01
Magnésio	0,02
Cobalto	0,005
Bário	0,05
Molibdénio	0,005

Tabela 8 - Micronutrientes essenciais

- **pH e Alcalinidade**

O pH ideal de funcionamento de um sistema de tratamento anaeróbio é 6,8 - 7,4, sendo possível o processo funcionar sem inibições consideráveis a 6,5 - 8 [45] [43] [41]. Os microrganismos metanogénicos são os mais sensíveis a variações de pH, enquanto os microrganismos acidogénicos conseguem atuar a pH inferiores, uma vez que a acidogénese tem um valor de pH ótimo de funcionamento de 5,5 - 6,5 [45] [41]. O pH pode diminuir para níveis de inibição [19] [43], por exemplo se houver acumulação de AGV ou dificuldade das bactérias acetoclásticas em degradar o acetato, sendo possível adicionar produtos químicos alcalinos para corrigir o valor de pH [46]. Para valores de pH elevados, o NH₃ pode provocar inibição.

A alcalinidade é a medida do poder tampão de um substrato que é submetido a DA, sendo avaliada em termos de resistência que oferece à variação do pH e expressa-se em mg.CaCO₃.L⁻¹. Pode ser considerada um melhor indicador da estabilidade do processo de DA que o pH, pois a acumulação de AGV origina uma diminuição da alcalinidade total, e pode não levar a uma variação do pH enquanto não for ultrapassado o poder tampão do meio de cultura [31]. Os substratos com elevado teor em proteínas apresentam maiores valores de alcalinidade. Os biodigestores estáveis funcionam com níveis de alcalinidade de 2500 - 5000 mg CaCO₃.L⁻¹ [19] [22].

- **Inibidores ou compostos tóxicos**

A inibição identifica-se através de vários indicadores [44]:

- Redução na produção de CH₄;
- Aumento da concentração de AGV;
- Diminuição na eficiência da remoção da CQO;
- Diminuição do valor de pH;
- Alteração do valor do potencial redox;

A inibição pode ser provocada por NH₃, sulfuretos, metais pesados, metais alcalinos e metais alcalino-terrosos. Quando provocada por metais, a redução da produção de CH₄ não tem origem na inibição da fase de metanogénese, mas afeta outros microrganismos presentes no processo de DA [47] citado por [36].

O alumínio não provoca inibição nos processos anaeróbios se a concentração se mantiver abaixo de 2500 mg/L [48]. Antibióticos, solventes orgânicos, pesticidas e detergentes podem ser tóxicos para a actividade metanogénica [49].

Em substratos com elevadas concentrações de sulfatos e sulfitos, a DA pode formar sulfuretos que são parcialmente convertidos em H_2S ($pH < 6,5$), um gás tóxico que em concentrações superiores a $0,1 \text{ g.L}^{-1}$ pode inibir a metanogénese [31].

O NH_3 funciona como fonte de N para os microrganismos presentes na DA e tem relativa importância no poder tampão do sistema, sendo um fator inibidor das bactérias metanogénicas a concentrações e pH elevados [19] [12] [50].

A Tabela 9 apresenta os efeitos da concentração do NH_3 na DA:

Efeito na DA	Amónia (mg/L)
Benéfico	50 – 200
Sem efeitos adversos	200 – 1000
Inibitório a valores de pH elevados	1500 – 3000
Tóxico	> 3000

Tabela 9 - Efeitos do NH_3 na DA [19]

A instabilidade num biodigestor manifesta-se, normalmente, pelo aumento da concentração de AGV que pode ser devido a vários fatores:

- Aumento da carga orgânica;
- Redução da temperatura;
- Introdução de substâncias tóxicas.

- **Agitação**

A agitação é um fator que se pode revelar importante na operação de um biodigestor, sendo os principais objetivos:

- Libertar o biogás preso no substrato acumulado;
- Agitar o substrato, a população bacteriana (inóculo) e as enzimas, melhorando a sua distribuição por todo o biodigestor;
- Prevenir gradientes de temperatura;
- Impedir a estratificação e a formação de camada de sólidos flutuantes [51].

A agitação melhora a transferência de materiais até às bactérias [52] e acelera a hidrólise e a fermentação. Distribui os aglomerados de microrganismos metanogénicos em todo o volume do biodigestor, melhorando o contacto com a MO a degradar.

Os fatores relacionados com a agitação que podem ter impacto na produção de biogás:

- A intensidade da agitação;
- O tempo de agitação;
- Localização do sistema de agitação [51].

Uma intensidade de agitação reduzida permite ao biodigestor reduzir o impacto do choque das forças de atrito, sendo preferível a uma agitação intensa [53].

Pode ser realizada de várias formas, por mecanismos mecânicos dotados de hélices ou turbinas, por injeção de biogás produzido no processo através de aspersores no fundo do biodigestor ou por bomba recirculadora de mistura [7] citado por [34]. A Figura 12 mostra os diferentes sistemas de agitação.

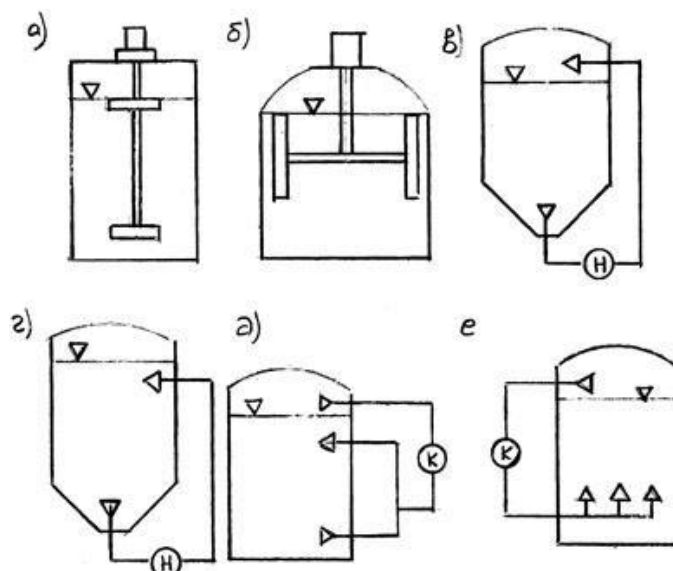


Figura 12 - Sistemas de agitação [54]

Resumidamente, a agitação ativa o processo de DA, liberta o biogás preso no substrato e aquece o biodigestor de modo uniforme.

2.3. Substrato

O substrato com que se alimenta o biodigestor é o componente fundamental de uma instalação anaeróbia para obter uma boa produção de biogás. Deve conter os níveis adequados de MO e de elementos essenciais à multiplicação e crescimento dos microrganismos intervenientes no processo, funcionando como doador de eletrões de C nas reações do processo de DA. Quando não há substrato suficiente para o desenvolvimento e manutenção dos microrganismos, o biodigestor para a sua atividade [34]. A instalação é dimensionada e operada em função das propriedades do substrato.

Quando se planeia um biodigestor é essencial avaliar os substratos disponíveis na área de implantação para alimentar o sistema. Na Tabela 9 apresentam-se os substratos geralmente disponíveis a partir de diversos setores.

<u>Municipal</u>	<u>Agricultura</u>	<u>Indústria</u>
Fração orgânica de RSU	Estrume	Resíduos de matadouro
Estrume humano	Culturas energéticas	Resíduos de processamento de cozinhas
	Algas	Resíduos bioquímicos
	Resíduos agro industriais	Polpa e pasta de papel

Tabela 10 - Substratos para o processo de DA [55]

Os substratos mais utilizados para produção de biogás são de tipo semi sólido, tais como o estrume bovino, as lamas de ETAR e a fração orgânica dos resíduos municipais.

A localização geográfica pode influenciar as propriedades do substrato. Esta tese de mestrado é direcionada para a aplicação de um biodigestor de pequena escala em comunidades rurais de países em desenvolvimento, propondo a tecnologia do sistema KUDURA. Nestas comunidades os substratos mais disponíveis são o estrume bovino e/ou por vezes suíno, que se adaptam bem ao processo anaeróbio, requerendo um controlo do biodigestor relativamente reduzido. O estrume bovino, como mostra a Figura 13, é particularmente adequado para DA, dada a presença de bactérias metanogénicas no estômago dos ruminantes [13] que inoculam continuamente o próprio sistema, garantindo maior estabilidade.



Figura 13 - Estrume bovino utilizado no biodigestor KUDURA

A produção de biogás a partir dos estrumes depende das condições de operação do biodigestor e da alimentação dos animais. A Tabela 11 apresenta a produção de biogás (m^3 de biogás/kg de estrume), aproximada, de cada tipo de animal.

Espécies	m^3 de biogás/kg de esterco
Poedeiras	0,1
Frangos de corte	0,09
Suínos	0,075
Caprinos	0,065
Bovinos de corte	0,04
Bovinos de leite	0,049
Codornas	0,049

Tabela 11 - Potencial de produção de biogás [11]

Os dejetos humanos são um tipo de substrato possível e adequado para os biodigestores de pequena escala e, geralmente, são adequados para implementação em escolas, prisões e centros hospitalares [56] [57]. No entanto, deve ser controlada a quantidade e a qualidade da água utilizada para limpeza das casas de banho [13], para evitar distúrbios na composição da mistura de alimentação do biodigestor que pode levar à instabilidade do processo de DA. Em países e culturas relacionadas com a religião muçulmana, o manuseamento de estrume e o uso de produtos de dejetos humanos (biogás e digerido) são um tabu cultural e religioso [58], sendo um entrave à utilização destes substratos para produção de energia e inviabilizando uma instalação de DA.

O uso de diversos substratos no mesmo biodigestor é, normalmente, uma vantagem para a produção de biogás devido à composição mais variada da MO que minimiza o teor de inibidores e pode estimular a

sinergia dos diversos microrganismos. No entanto, há que ser prudente com determinados substratos que podem prejudicar o funcionamento do biodigestor, como por exemplo o uso de efluentes industriais com compostos inibidores, por exemplo metais ou fenóis. Algumas plantas ricas em lignina não são digeridas sob condições anaeróbicas [59] citado por [55] e não geram biogás, podendo inclusive colmatar o reator. Um substrato potencialmente vantajoso para um processo anaeróbio é a gordura alimentar, embora deva ser adicionada em quantidades corretas.

Na Europa têm sido promovidas as culturas energéticas como fonte de alimentação de biodigestores anaeróbios, como por exemplo milho, tritcale, cevada, entre outros, que apresentam produção de biogás superior aos resíduos animais.

O substrato é composto por matéria seca (MS), sólidos totais (ST) e água. A MS é composta por MO e por MO parcialmente biodegradável definida como sólidos voláteis (SV), que determinam a produção de biogás. Os SV são o parâmetro mais utilizado para avaliar e quantificar os resíduos orgânicos. Substratos com teor em SV de 5% - 10% são ideais para biodigestores domésticos [5]. Nos países de clima quente, os estrumes de vaca ou porco podem resultar mais concentrados devendo ser diluídos numa relação 1:1 com água antes de ser adicionado ao biodigestor [13].

Na Figura 17 apresenta-se um resumo do caminho dos principais componentes do substrato. Aos SV presentes na Figura 14 adicionam-se as fibras e a lignina, que sendo parte dos SV, não são biodegradáveis.

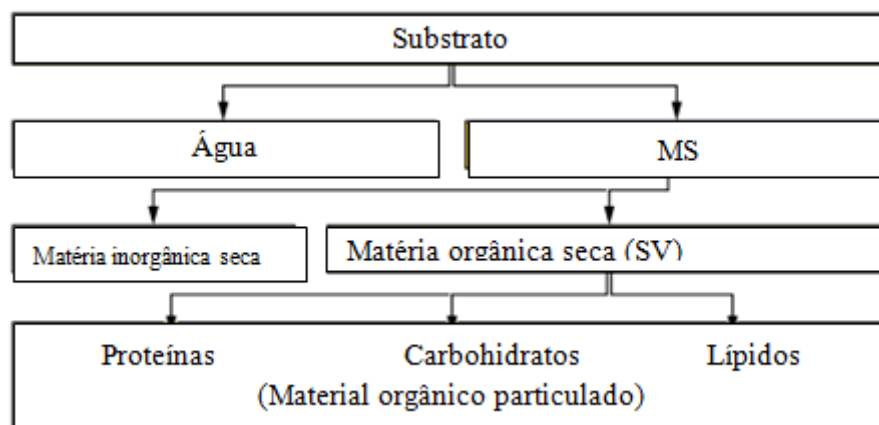


Figura 14 - Classificação do substrato [60]

Na Tabela 11 apresentam-se valores típicos de MS e de produção de biogás de vários substratos. As determinações de ST ou MS e SV são bastante divergentes de autor para autor, sendo esta diferença devido à amostragem e ao estado de degradação do substrato.

Tipo de substrato	Classificação	Matéria seca (%)	Teor em cinzas (%)	Nutrientes digestíveis (%)	Quantidade de biogás produzida
Dejetos	Bovino	38	14	92	0,6-0,8 m ³ /kg TS
	Suíno	20-25	n.d.	n.d.	0,27-0,45 m ³ /kg TS
	Búfalo	14	n.d.	n.d.	n.d.
	Cavalo	28	n.d.	n.d.	0,4-0,6 m ³ /kg TS
	Humanos	20	n.d.	n.d.	n.d.
Resíduos Agricultura	Arroz	91	13	40	0,55-0,62 m ³ /kg TS
	Trigo	91	8	43	0,188 m ³ /kg VS
	Milho	86	n.d.	n.d.	0,4-1,0 m ³ /kg TS
	Erva	88	6	58	0,28-0,55 m ³ /kg VS
	Café	28	8	n.d.	0,300-0,450 m ³ /kg VS
Restos de comida	Leite	94	10	82	n.d.
	Vegetais	5-20	n.d.	n.d.	0,4 m ³ /kg TS
	Fruta	17	2	70	n.d.
	Ovos	25	n.d.	n.d.	0,97-0,98 m ³ /kg TS
	Cereais	85-90	n.d.	n.d.	0,4-0,9 98 m ³ /kg TS
	Cozinha/Restaurante	27/13	13/8	n.d.	0,506/0,650 m ³ CH ₄ /kg VS

Tabela 12 - Produção de biogás a partir de diferentes substratos [61]

O indicador mais comum para a produção de biogás é o potencial biológico de metano (BMP) que pode ser exprimido como o valor máximo de CH₄ por unidade de diversos parâmetros abaixo apresentados, cujo rigor está por ordem decendente [62] citado por [55]. Também é utilizada a produção de biogás em vez de produção de CH₄.

1. Nm³ CH₄ / kg SV;
2. m³ CH₄ / kg SV;
3. m³ biogás / kg SV;
4. m³ biogás / kg ST;
5. m³ biogás / tonelada substrato (peso húmido).

2.3.1. Recolha e transporte do substrato

A recolha e transporte do substrato são componentes muito importantes para o sucesso de um biodigestor, pois o sistema tem que ser alimentado diariamente para garantir uma produção contínua e estável. A logística toma assim um aspeto preponderante e as instalações de sistemas anaeróbios

devem situar-se próximas dos locais em que existe disponibilidade de substrato que alimente o biodigestor, diminuindo as despesas de transporte, aspeto chave para a rentabilidade de uma pequena instalação. Nos países em desenvolvimento, normalmente, a recolha do estrume é feita por mulheres que perdem uma parte significativa do seu tempo diário nesta tarefa. Na Figura 15 consta a foto de uma mulher a transportar estrume para o biodigestor.



Figura 15 - Recolha de substrato [63]

Os resíduos de alimentação ao biodigestor devem estar isentos de corpos e materiais grosseiros (pedras, ramos, plásticos), sendo preferencialmente separados na fonte, evitando a criação de um sistema de triagem nas instalações, minimizando infraestruturas e custos de mão-de-obra. Salienta-se que os materiais grosseiros podem ficar acumulados no biodigestor e provocar problemas de entupimento.

Após a recolha do substrato, o tempo de armazenamento antes de alimentar o biodigestor tem que ser o mais curto possível, principalmente em climas quentes e húmidos, para não ocorrer degradação antes de ser adicionado ao biodigestor e não se perder uma parte significativa do seu valor energético e do rendimento em biogás. Outra razão para encurtar o tempo de armazenamento é a proliferação de doenças através de insetos e/ou roedores que se alojam junto do substrato. Se for totalmente impossível evitar o armazenamento, é recomendado juntar todo o substrato numa pilha coberta, de forma a não aquecer e perder humidade [55].

2.3.2. Pré tratamento e alimentação

O substrato, geralmente, requer pré tratamento antes de ser adicionado ao biodigestor, nomeadamente, pode ser preciso adicionar água, reduzir o tamanho das partículas ou retirar a matéria inorgânica. A Figura 16 mostra uma situação na qual se retiram as palhas e pedras manualmente.



Figura 16 – Sistema de pré tratamento

A etapa de pré tratamento de redução do tamanho do substrato pode ajudar à degradação dos SV e, consequentemente, aumentar a produção de biogás [64].

A separação da fração inorgânica pode ser feita de forma manual ou mecânica. Se o objetivo for apenas tratar resíduos com pouca importância na relação custo-eficácia, a separação pode ser evitada [65]. No entanto, quando o objetivo é obter um digerido com elevada qualidade, a remoção prévia de componentes indesejados melhora o resultado final.

Em resumo, o pré tratamento num processo de DA é, geralmente, utilizado para:

- Separar elementos não biodegradáveis que podem ficar acumulados ou mesmo entupir o tubo de saída do digerido e interferir com o biodigestor;
- Evitar perda de volume de digestão por acumulação de inertes que pode provocar a paragem do sistema de agitação;
- Reduzir a quantidade de material rico em fibras, pois cria problemas ao processo de digestão e pode causar uma camada de espuma indesejável no topo da mistura, difícil de controlar;
- Reduzir o tamanho das partículas de substrato para evitar entupimentos no tubo de entrada e de saída do biodigestor, aumentando a área superficial total da matéria e facilitando a degradação [66].

Para se efetuar o processo de DA em regime húmido, a MS deve ser inferior a 15 %, devendo adicionar-se um determinado volume de água, se necessário. Em regime estacionário, o volume de entrada do biodigestor é igual ao volume expelido pelo tubo de saída, mantendo constante o volume interno de digestão. É possível utilizar uma percentagem de digerido durante a preparação da mistura de alimentação, economizando água. Esta medida, além de economizar água, inocula a mistura fresca, iniciando a digestão mais rapidamente [55].

Se o biodigestor for de carregamento “batch ou descontínuo”, a alimentação é feita de uma única vez e, quando terminar a produção de biogás o sistema é esvaziado, tornando o volume disponível para uma nova carga. Se o biodigestor for operado em contínuo, a alimentação deve ser diária, numa única vez ou escalonada durante o dia. Se se assegurar a alimentação constante, a produção de biogás mantém-se regular.

2.4. Biodigestores de pequena escala

Um biodigestor é constituído por um tanque dimensionado e realizado com o objetivo de garantir a ausência de O_2 no seu interior, ambiente anaeróbio, essencial para o desenvolvimento de

microrganismos metanogénicos capacitados para degradar MO e transformá-la em biogás. A escolha de um biodigestor adequado ao resíduo e bem dimensionado é fundamental para um bom projeto. No dimensionamento de um biodigestor é importante conhecer a disponibilidade anual de substrato e das fontes de água disponíveis, pois em países em desenvolvimento pode ser um fator limitante da operação, sendo que normalmente há escassez de água. Outro fator importante na decisão de instalação de um biodigestor é a existência de pessoas com formação para a construção, operação e manutenção do biodigestor.

Componentes da instalação de um biodigestor em pequena escala:

- Caixa de entrada;
- Tanque de digestão;
- Caixa de saída;
- Purificador de biogás;
- Saco de armazenamento para o biogás produzido até ser encaminhado para o seu destino final.

A IEA [1] afirma que os biodigestores domésticos permitem um uso mais eficiente do estrume, convertendo este em biogás que pode ser utilizado como combustível para cozinhar ou para iluminação.

Os biodigestores de pequena escala são, geralmente, operados com alimentação em semi-contínuo. Nos países em desenvolvimento existem três tipos principais de biodigestor:

- Cúpula fixa ou chinês;
- Tambor flutuante ou indiano;
- Tubular de polietileno ou fluxo em pistão.

Os biodigestores de cúpula fixa e de tambor flutuante, ambos operados em semi contínuo e sem agitação, diferem entre eles pela cúpula que no primeiro caso é fixa, enquanto no biodigestor de tambor flutuante é variável, subindo com o volume de biogás produzido. Os biodigestores tubulares de polietileno são operados em semi-contínuo e com fluxo em pistão.

Muitos biodigestores dimensionados em pequena escala falham o seu funcionamento devido a várias razões [56] [13]:

- Concepção;
- Custo de capital elevado;
- Construção;
- Problemas de operação e manutenção;
- Disponibilidade de substrato;

De forma a evitar estas causas de falha, Ocwieja [56] afirma ser vantajoso:

- O biodigestor ser localizado em local que favoreça o operador, evitando dispendir trabalho e dinheiro na coleta e transporte de substrato;
- Otimizar os processos de operação e manutenção;
- Disponibilizar formação ao operador para evitar falhas humanas;
- Apoio do governo ao sistema.

2.4.1. Biodigestor de cúpula fixa ou chinês

Os biodigestores de cúpula fixa são, geralmente, alimentados com estrume animal misturado com água (relação de 1:1) a partir da caixa de entrada, na qual existe um tubo que transporta a mistura até ao seu interior. A Figura 17 mostra um biodigestor de cúpula fixa com os seus componentes principais.

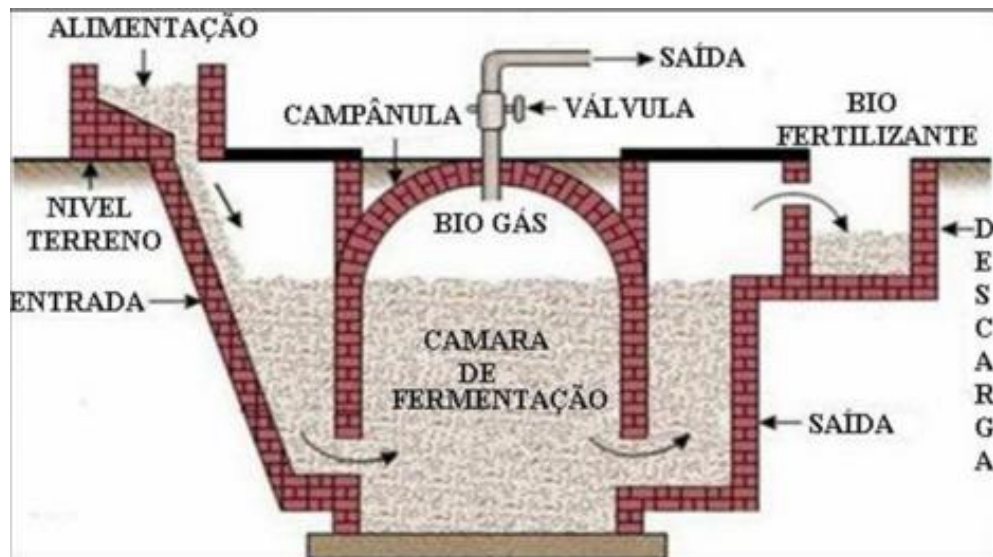


Figura 17 - Esquema de biodigestor de cúpula fixa ou chinês [67]

A mistura no interior do biodigestor divide-se em duas camadas, uma de biossólidos situada no fundo e uma de líquido da mistura acima da anterior. Com o aumentar da produção de biogás, a pressão aumenta no biodigestor e faz com que a camada presente no fundo seja empurrada para a caixa de saída [56].

Este tipo de biodigestor é, geralmente, construído em alvenaria num buraco feito no chão (como consta na Figura 18) com isolamento à prova de gás, pois é pintado com uma tinta constituída por polímeros, para permitir o aumento de pressão no seu interior [13].

Vantagens:

- Ausência de partes móveis;
- Custos reduzidos;
- Tempo médio de vida de 20 anos.

Desvantagens:

- São necessários materiais especiais para evitar fugas de gás;
- Dificuldades na utilização do biogás devido às variações de pressão;
- Operação difícil pois não há percepção visual da produção de biogás no interior do biodigestor.

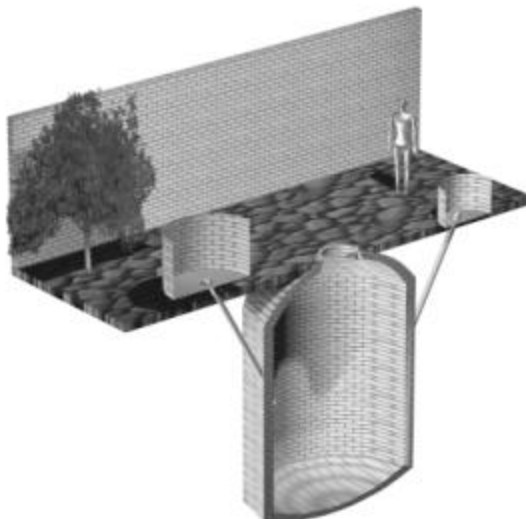


Figura 18 - Biodigestor de cúpula fixa ou chinês [68]

2.4.2. Biodigestor de tambor flutuante ou indiano

Os biodigestores de tambor flutuante são alimentados com uma mistura de estrume com água (relação de 1:1) na caixa de entrada, tal como os biodigestores de cúpula fixa. Também, tal como no biodigestor de cúpula fixa, há a formação de uma camada de biossólidos no fundo e uma camada de mistura líquida acima desta. O tambor flutuante, como mostra a Figura 20, é construído em aço e deve ser bem dimensionado para corresponder ao diâmetro do biodigestor e não haver fugas de biogás, flutuando numa camisa de água construída em volta do biodigestor ou inserido diretamente na mistura [13]. A Figura 19 apresenta o esquema um biodigestor de cúpula flutuante.

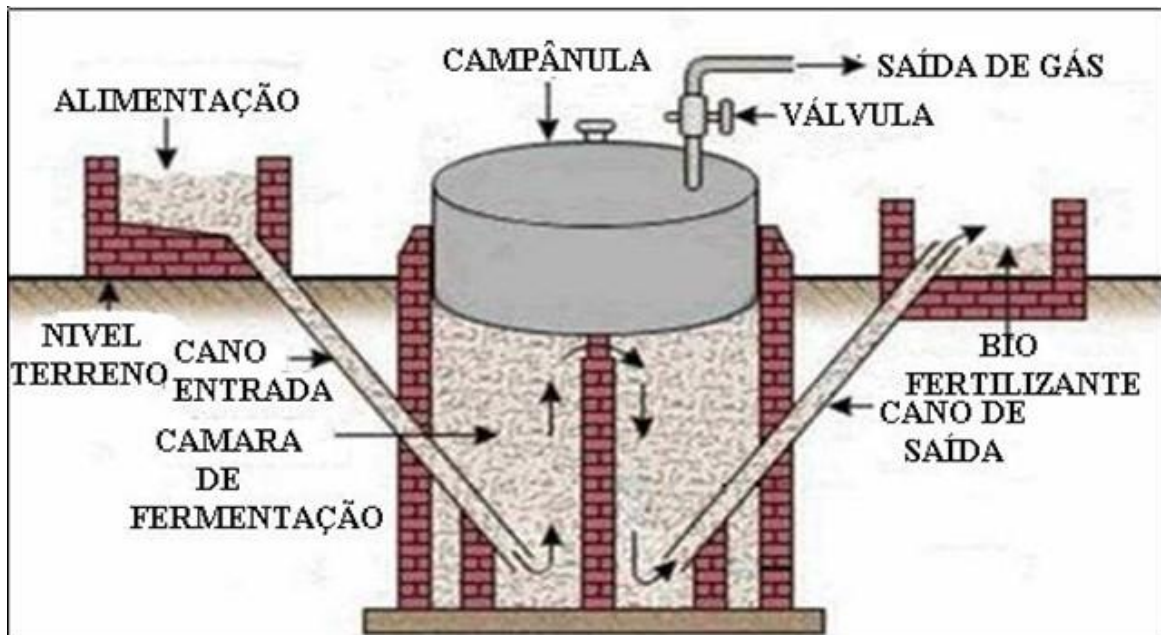


Figura 19 - Esquema de biodigestor de tambor flutuante ou indiano [67]

Vantagens:

- Fácil de operar;
- Manutenção do tambor através de remoção de ferrugem e pintura regular;
- O operador consegue perceber a produção de biogás porque o tambor varia a sua altura conforme aumenta ou diminui a pressão no seu interior.

Desvantagens:

- Preço elevado do tambor de aço;
- Dificuldade em construir o tambor e assegurar a respetiva manutenção [56];
- Tempo de vida na ordem dos 5 a 15 anos;
- Possível encravamento do tambor na armação guia de construção [13].



Figura 20 - Biodigestor de tambor flutuante ou indiano [69]

2.4.3. Biodigestor tubular de polietileno ou de fluxo em pistão

Os biodigestores de fluxo em pistão são operados em semi contínuo e a sua construção é feita numa trincheira, com 2 % – 5 % de inclinação para haver escoamento da mistura da entrada para a saída do biodigestor, através de duas camadas de polietileno, formando um tubo. A Figura 21 apresenta o esquema de um biodigestor de fluxo em pistão.

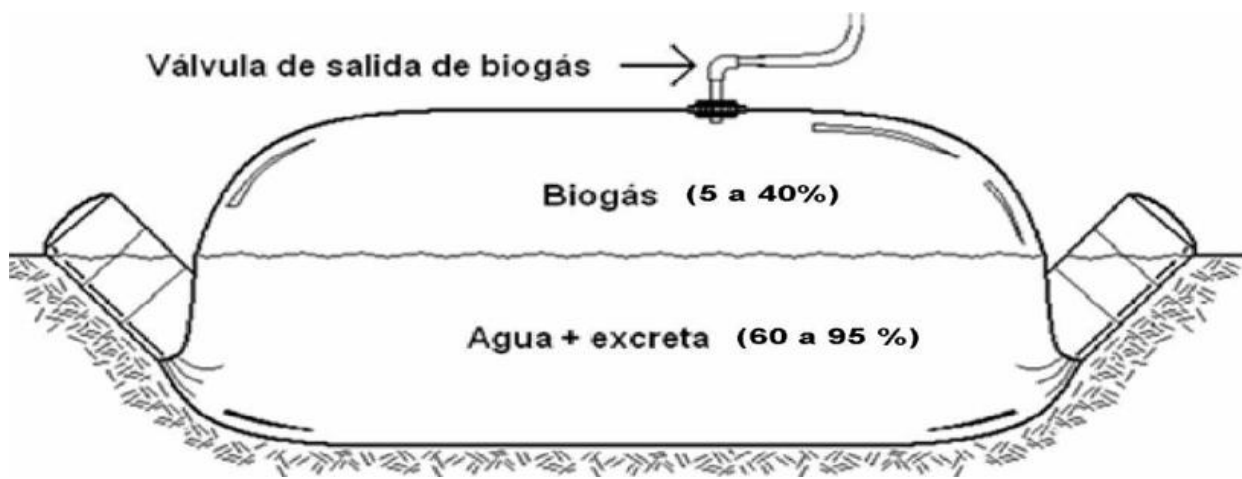


Figura 21 - Biodigestor de fluxo em pistão ou tubular de polietileno [70]

A alimentação do biodigestor é feita através da caixa de entrada e, ao mesmo tempo, a mesma quantidade de digerido é expelido para a caixa de saída. Na base do biodigestor vão-se acumulando biossólidos, levando a limpeza periódica. O armazenamento do biogás é feito no interior do biodigestor, aumentando a altura. Como este tipo de biodigestor não tem agitação, além daquela provocada pela alimentação, existe diferente concentração de mistura ao longo do biodigestor. A Figura 22 mostra um biodigestor real deste tipo.

Vantagens:

- Custos reduzidos;
- Fácil construção;
- Muito eficiente na remoção de contaminantes individuais como a amónia.

Desvantagens:

- Tempo de vida de 2 - 10 anos [71];
- Concentração de substrato elevada na entrada do biodigestor, o que pode provocar alterações prejudiciais no pH [72].



Figura 22 - Biodigestor de fluxo em pistão [73]

2.4.4. Biodigestor KUDURA

O biodigestor KUDURA é um modelo desenvolvido pela RVESOL, construído em aço inoxidável e foi desenvolvido com o objetivo de satisfazer as necessidades de biogás para cozinhar das comunidades rurais de países em desenvolvimento. O biodigestor é construído em aço inoxidável, revestido com isolamento térmico, tendo apenas exposta a base e as janelas da frente.

Tem a possibilidade de operar em diferentes gamas de temperatura, dado ser aquecido através de painéis solares térmicos, o que permite otimizar a produção de biogás e selecionar a temperatura mais favorável. Pode ser operado em modo contínuo e em descontínuo. Possui duas câmaras, sendo a primeira de pré aquecimento e a outra de DA. É controlado através de um autómato que regista a temperatura e gere a alimentação, a circulação de água quente e agitação do substrato.

3. Metodologia

O biodigestor foi inicialmente operado na gama de temperatura mesofílica com o intuito de caracterizar as suas condições normais de operação. De seguida foram ensaiadas medidas com o objetivo de aumentar a produção diária de biogás, nomeadamente a agitação operada em dois intervalos de tempo diferentes e o ensaio na gama termofílica sem agitação. A disponibilidade de eletricidade 24 h por dia permitiu manter a temperatura da DA aproximadamente constante. A montagem da rede de biogás, do aquecimento da câmara de DA e das restantes partes hidráulicas foram efetuadas pelo signatário, por um técnico de instalações e por um soldador, com o apoio do co-Orientador. A operação do biodigestor decorreu diariamente de 1 de Outubro a 27 de Novembro de 2015. As principais tarefas diárias do signatário foram a preparação da mistura de do substrato com água, a alimentação do biodigestor e a queima de biogás, ocupando cerca de 2h -3h. Periodicamente foi recolhido estrume numa vacaria.

O biodigestor foi instalado no interior de um contentor que é parte integrante do sistema KUDURA, sendo dotado de um autómato industrial que monitoriza e envia dados remotamente para uma base de dados, possibilitando a consulta através de ligação à internet. As especificações técnicas do biodigestor apresentam-se no Anexo I.

O autómato monitoriza e regista, de 5 em 5 minutos, as variáveis que constam na Tabela 13:

Variável	Medição
Temperatura DA	°C
Temperatura pré aquecimento	°C
Temperatura serpentina	°C
Temperatura interior do contentor	°C
Bomba de circulação	Ligada/Desligada
Transmissor de impulsos	I
Pressão	mbar
Bomba de agitação	Ligada/Desligada

Tabela 13 - Monitorização e registo pelo autómato

O biodigestor foi construído em aço inoxidável por poder ser reparado por soldadura a nível rural.

Foi transportado num camião das instalações da RVESOL para a Alcaidaria, uma vila próxima a Leiria, local onde foi instalado e foi desenvolvido o trabalho descrito no presente estudo.

3.1. Operação e Manutenção

O estrume, como mostra a Figura 40, foi transportado por meio de uma carrinha até à instalação, proveniente de vacas leiteiras estabuladas e alimentadas com ração, palha de trigo e silagem de milho. A densidade média do estrume é 700 kg/m^3 , valor calculado com base em 6 pesagens.



Figura 23 - Coleta do estrume na vacaria

O biodigestor foi alimentado diariamente numa única vez.

Na fase inicial filtrava-se a mistura numa rede com malha de 2 cm * 2 cm, como mostra a Figura 41. Esta operação era muito demorada e permitia remover apenas 3 kg - 5 kg de palhas por cada 100 kg de mistura. Assim, passou-se a bombear a mistura para o biodigestor sem pré tratamento de filtração. Foi utilizada uma relação de 1:1 de água e substrato como está sugerido pela literatura da especialidade.



Figura 24 – Pré tratamento da mistura de alimentação

Operação de alimentação diária:

1. Preparação da mistura;
2. Alimentação do biodigestor com mistura direta ou pré aquecida na câmara de pré aquecimento, atuando sobre as eletroválvulas:
 - a. Botão para ligar o sistema;
 - b. Botão para abrir as eletroválvulas, fechando a eletroválvula#2 40 segundos depois;
3. Bombeamento da mistura preparada para a câmara de pré aquecimento;
4. Fecho da eletroválvula#1;
5. Esvaziamento, de 3 em 3 dias, do balde de acumulação do digerido;
6. Queima do biogás realizada ao mesmo tempo que o processo de alimentação;
7. Controlo dos valores de temperatura e pressão registados na base de dados;
8. Limpeza do espaço circundante e do material utilizado, pois evita cheiros, degradação e alojamento de animais na zona do biodigestor;

O biogás produzido foi queimado quando o nível de CH_4 atingiu valores aceitáveis, evitando o perigo de explosão. O biogás para análise foi recolhido do saco de armazenamento e transportado dentro de um saco apropriado até ao LNEG, local onde foi analisado com recurso a aparelho medidor portátil que aspirou o biogás.

As leituras de biogás foram efetuadas entre as 11h de dias sucessivos.

Para análise do pH recolheu-se uma amostra do líquido digerido e mergulhava-se a sonda até o valor estabilizar, como mostra a Figura 39. De 2 em 2 dias o medidor era calibrado com as soluções de pH 4 e 7 e lavado com água destilada, como sugrido no guia de instruções.

Recolheu-se 1,5 l de mistura e de digerido para analisar em laboratório acreditado (CESAB) para serem determinadas as concentrações de diversos parâmetros do substrato: SV, SSV, ST, SST, potencial redox e AGV.

3.1.1. Período de arranque

O arranque de um biodigestor é um período de operação necessário para criar uma população bacteriana ativa, eficiente e estabilizada, de modo a possibilitar o funcionamento estável do sistema e a produção de elevada quantidade de biogás. Sendo um período em que existem custos de operação sem proveitos significativos, é do interesse do operador encurtar esta fase. O arranque pode ser feito com ou sem adição de inóculo, de acordo com o substrato utilizado. Para acelerar o arranque é fundamental introduzir inóculo, de preferência adaptado ao substrato a tratar e retirado de outro biodigestor em funcionamento à temperatura do processo escolhido. No caso de efluentes de vacarias estes normalmente contêm bactérias metanogénicas que asseguram o arranque do processo num prazo relativamente curto.

Segundo a orientação do Doutor Santino Di Berardino, a quantidade de inóculo a inserir num biodigestor varia de 5 % – 10 % até 40 % – 50%, dependendo da distância e da disponibilidade do inóculo utilizado. Quando não existe inóculo nas vizinhanças que reúna as características exigidas e se o substrato não contém bactérias metanogénicas, o arranque torna-se mais complexo e demorado, pois é necessário recorrer a técnicas que promovam o crescimento das bactérias metanogénicas no próprio substrato.

No presente caso, prevendo-se a degradação de estrume de vaca de produção de leite, que contém bactérias metanogénicas, optou-se por um arranque sem inóculo, enchendo o biodigestor com o resíduo diluído a 50% com água até ocupar cerca de 1400 L, todo o volume útil do biodigestor.

O arranque do biodigestor foi efetuado na gama mesofílica, inicialmente a 36 °C, 15 dias depois diminuiu-se para 35 °C e dia 19 foi ajustada para 37 °C.

10 dias depois do carregamento inicial teve início a alimentação diária de 30 l/dia durante 3 dias, correspondendo a um tempo TRH de aproximadamente 50 dias. Registou-se a evolução progressiva do volume da produção do biogás, indicando a boa adaptação do sistema ao substrato.

De seguida alimentou-se o biodigestor, durante 3 dias, com 50 l/dia. No período sucessivo aumentou-se para 100 l/dia, durante 9 dias.

A eletroválvula#1 apresentada na Figura 26 avariou no início da alimentação de 50 l/dia, mantendo-se aberta até ao fim do estudo, levando a que o acesso à câmara de DA fosse operado manualmente durante o restante estudo.

3.1.2. Período em regime mesofílico com alimentação de 100 l/dia

O ensaio na gama mesofílica com alimentação de 100 l/dia e temperatura na ordem dos 37 °C, ocorreu durante 4 dias, sendo a medição do pH efetuada em 3 dos 4 dias de operação. A alimentação foi realizada de forma direta e pré aquecida.

3.1.3. Período em regime mesofílico com alimentação de 150 l/dia

O ensaio na gama mesofílica com a alimentação de 150 l/dia foi estudado durante 6 dias a seguir ao ensaio mesofílico com alimentação de 100 l/dia. A medição do pH foi efetuada todos os dias e a alimentação foi realizada de forma direta e pré aquecida, com o objetivo de analisar o impacto do pré aquecimento no desempenho do sistema.

3.1.4. Período em regime mesofílico com agitação de 5 min/3h

Continuou a alimentação diária de 150 l/dia e passou-se a ensaiar o efeito da agitação com um regime de 5 minutos a cada 3h. A agitação era proporcionada pela bomba submersível, ativada pelo autómato de acordo com o período pré definido de 5 min/3h. Esta experiência teve a duração de apenas 3 dias devido a ter tido mau resultado, proporcionando menor produção de biogás. A alimentação foi feita de forma alternada entre direta e pré aquecida, com o objetivo de continuar a avaliar o impacto térmico na temperatura de DA. A medição do pH ocorreu em todos os dias do ensaio.

3.1.5. Período em regime mesofílico com agitação de 5 min/12h

A agitação de 5 min/3h pareceu excessiva e, assim, decidiu-se aplicar um intervalo de agitação superior, optando-se por um regime de 5 min/12h. Operou-se o sistema nesta gama de agitação durante 6 dias, intercalando alimentação direta com pré aquecida. O pH foi medido apenas nos primeiros 3 dias, pois realizaram-se 12 medições diárias sucessivas em que não ocorreram alterações significativas que justificassem continuar com a medição diária. No fim desta experiência foi desligada a agitação para dar início ao ensaio seguinte.

3.1.6. Período em regime termofílico

O ensaio na gama termofílica ocorreu durante 9 dias e a alimentação diária, direta ou pré aquecida, foi mantida nos 150 l/dia. Definiu-se o intervalo de ação da bomba de circulação em 43 °C – 44 °C. Mediu-se o pH apenas duas vezes nesta gama, no início e no fim, verificando-se estável.

3.1.7. Período de perdas térmicas do biodigestor

O período de ensaio foram 7 dias e a alimentação de 150 l/dia só foi feita durante dias. Tendo em vista estimar as perdas térmicas do biodigestor, o sistema de aquecimento foi desligado durante a noite e medida a respetiva queda de temperatura. Esta determinação é importante, pois na instalação real o sistema será aquecido por painéis solares térmicos, não recebendo energia durante a noite. Este ensaio permite estimar a quantidade de calor perdido no período noturno e a eficiência do sistema de proteção térmica. Numa unidade bem isolada a queda térmica deveria ser inferior a 1 °C. Para efetuar esta experiência partiu-se com base nos valores de temperatura do painel solar térmico instalado no Quénia, estimando-se que a produção de energia solar térmica estaria disponível entre as 7h e as 15h, sendo esse o período de ligação do termoacumulador.

4. Conclusões e Sugestões futuras

Através dos resultados obtidos neste trabalho, apesar de ter havido oscilações e variações bruscas de alimentação do biodigestor, podem retirar-se conclusões importantes quanto ao comportamento e desempenho do sistema e definir medidas que poderão melhorar o seu rendimento, nomeadamente:

Operação do sistema:

Foram detetados alguns pontos a nível de design e componentes do biodigestor suscetíveis de melhoramento, mais precisamente a câmara de pré aquecimento, a alimentação e ao nível das eletroválvulas.

Processo da DA:

- O processo de DA manteve um valor de pH favorável à produção de biogás durante todo o estudo, próximo de 7.
- O biogás analisado apresentou boa qualidade, com 65 % de CH_4 e 14,3 ppm de H_2S , podendo ser utilizado nos dispositivos mais exigentes, como motores geradores.
- O desempenho da hidrólise no biodigestor foi bastante limitado, pois converteu apenas 6,8% da matéria volátil em suspensão.
- A digestão decorreu com eficácia, havendo poucos AGV por degradar no efluente digerido.
- A redução de SV foi de 27 %, havendo bastante material orgânico remanescente no efluente com menor biodegradabilidade.
- Contrariamente ao previsto, a produção de biogás foi maior em regime mesofílico com alimentação de 100 l/dia e de 150 l/dia do que em regime termofílico com alimentação de 150 l/dia. A produção máxima foi obtida com alimentação 100 l/dia em regime mesofílico.
- O potencial redox medido na saída do biodigestor, -194, estava um pouco acima da gama típica (- 250 mV a - 300 mV), possivelmente devido ao contacto com o ar na amostra.
- O baixo desempenho do regime termofílico pode ser devido a não ter havido tempo suficiente para adaptação da comunidade biológica a esta temperatura.

Medidas sugeridas para melhoramento do rendimento do processo de DA:

- Sugere-se a preparação da mistura de alimentação ao biodigestor com 50% de substrato, 20% - 30% de digerido e o restante de água, o que permite poupar água e inocular o biodigestor com uma maior população de bactérias.
- Para obter um desempenho mais significativo sugere-se aumentar o TRH para pelo menos 15 dias ou 20 dias.

Medidas sugeridas para melhoramento da operação:

- Com base nas conclusões acima referidas sugere-se o aumento do declive na câmara de pré aquecimento, facilitando a alimentação, e a alteração da sua disposição dentro do biodigestor, para que fique mergulhada na mistura de digestão, aquecendo a mistura de um dia para o seguinte à temperatura de digestão e sendo parte integrante do circuito de biogás, o que evita perdas. Com estas medidas ocorre um aumento do volume de digestão.

Medidas sugeridas para melhoramento do sistema:

- A alimentação da mistura diária foi feita na base do biodigestor, sendo que a saída do digerido foi feita na lateral, próxima da base, o que pode levar a perdas de mistura por digerir pela saída do digerido. Assim sugere-se a alteração da saída do digerido para próximo do topo do nível de digestão.
- Sugere-se a alteração do sistema de limpeza de biogás de PVC para aço inox, devido às reações exotérmicas existentes.

- Sugere-se a alteração da saída do biogás para o topo do biodigestor para aumentar o nível de digestão.

Concluindo, é recomendável o biodigestor ser o mais simples possível para diminuir as possíveis avarias, que podem interferir no rendimento global do sistema.

Bibliografia

- [1] "Africa Outlook: A focus on energy prospects in Sub-Saharan Africa," (IEA), International Energy Agency, World energy outlook special report, 2014.
- [2] World Health Organization (WHO), "World Health Statistics," World Health Organization (WHO), 2014.
- [3] A. Mwakaje, "Dairy farming and biogas use in Rungwe district, South-west Tanzania: A study of opportunities and constraints," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 12, pp. 2240-2252, 2008.
- [4] M. Subedi and et al, "Can biogas digesters help to reduce deforestation in Africa ?," *Biomass and Bioenergy*, no. 70, pp. 87-98, 2014.
- [5] Ludwig Sasse, *Biogas Plants*. Germany: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1988.
- [6] (2015, outubro) Blog da sinarmas world academy. [Online]. <http://blogs.swajkt.com/swa/11625/files/2014/09/using-wood-for-cooking.jpg>
- [7] G. Tchobanoglous, G. Burton, and H. Stensel, *Wastewater engineering: Treatment and resue*. New York, USA: McGraw Hill, 2003.
- [8] H. Katawal and A. Bohara, "Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 2668-2674, 2009.
- [9] P. Walekhwa and et al, "Economic viability of biogas energy production from family-sized digesters in Uganda," *Biomass and Bioenergy*, no. 70, pp. 26-39, 2014.
- [10] S. Samoyoa and et al, *Implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas*, 1st ed., SNV, Ed. Honduras, 2012.
- [11] Empresa de Pesquisa Energética, "Aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS," Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, Nota Técnica 2008.
- [12] A. Steinhäuser and D. Deublein, *Biogas from waste and renewable resources*. Germany: Wiley-VCH, 2008.
- [13] ISAT/GTZ, *Biogas Digest Volume II. Biogas - Application and Product Development*.: Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1999.
- [14] H. Barker, "Studies on methane producing bacteria," *Archives of Microbiology*, no. 7, p. 420, 1936.
- [15] W. Silva, "Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais," Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa, Paraíba - Brasil, 2009.
- [16] J. Hilbert, *Manual para la produccion de biogas*. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural.
- [17] F. Schmitt and et al, "Tratamento anaeróbio de efluentes," Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - Brasil, Brasil, 2006.
- [18] J. Nour and E. Abdul, "Tratando nossos esgotos: processos que imitam a natureza," *Cadernos temáticos de química nova na escola*, pp. 19-30, Maio 2001.
- [19] P. McCarty, "Anaerobic waste treatment fundamentals – part one: chemistry and microbiology; part two: environmental requirements and control, part three: toxic materials and their control, part four: process design," *Public Works*, 1964.
- [20] M. Moreno, *Manual de Biogás*, Proyecto CHI/00/G32, Ed. Santiago do Chile, Chile, 2011.
- [21] M. Alves and M. Mota, "Reactores para tratamento anaeróbio," in *Reactores Biológicos - Fundamentos e Aplicações*, J. Teixeira, M. Fonseca, Ed. Lisboa, Portugal: Lidel, 2007, pp. 373-393.
- [22] N. Lapa, Material de ensino da disciplina de Bioenergia, 2011, Mestrado em Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis, FCT-UNL.

- [23] D. Azeitona, "Efeitos de pré tratamentos térmicos na digestão anaeróbia termofílica de resíduos de casca de batata," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica - Portugal, Tese de doutoramento 2012.
- [24] M. Monte, "Contributo para o estudo da valorização energética de biogás em estações de tratamento de águas residuais," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Tese de mestrado 2010.
- [25] I. Angelidaki and W. Sanders, "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants," *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, no. 3, pp. 117 - 129, 2004.
- [26] W. Gujer and A. Zehnder, "Conversion Processes in Anaerobic Digestion," *Water Science and Technology*, vol. 15, pp. 127-167, 1983.
- [27] A. Van Haandel and G. Lettinga, *Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente*. Campina Grande - Paraíba, Brasil, 1994.
- [28] S. Bengtsson and et al, "Acidogenic fermentation of industrial wastewaters: Effects of chemostat retention time and pH on volatile fatty acids production," *Biochemical Engineering Journal*, no. 40, pp. 492-499, 2008.
- [29] Y. Teh and S. Zinder, "Acetyl-coenzyme A synthetase in the thermophilic, acetate-utilizing methanogen *Methanotrix* sp. strain CALS-1," *FEMS Microbiology Letters*, vol. 98, pp. 1-7, Novembro 1992.
- [30] K. McMahon and et al, "ANAEROBIC CODIGESTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND BIOSOLIDS UNDER VARIOUS MIXING CONDITIONS - II: MICROBIAL POPULATION DYNAMICS," *Wat. Res.*, vol. 35, no. 7, pp. 1817-1827, 2001.
- [31] Centro para a conservação de energia, *Guia Técnico de Biogás*. Algés, Portugal, 2000.
- [32] S. Yang and M. Guo, "Kinetics of methanogenesis from whey permeate in packed bed immobilized cells bioreactor," Ohio State University, Columbus - Ohio, 1990.
- [33] H. Ecke and A. Lagerkvist, "Anaerobic treatment of putrescible refuse," Lulea University of Thecnology, Lulea, Review 2000.
- [34] L. Rowse, "Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries," University of South Florida, Florida, Tese de Mestrado 2011.
- [35] L. Fry, *Methane digesters for fuel gas and fertilizer*, Y. Merril R. Merril, Ed. Santa Barbara, California: The New Alchemy Institute, 1973.
- [36] N. Ribeiro, "Estudos dinâmicos do processo de digestão anaeróbia com vista ao desenvolvimento de um sistema inteligente de supervisão baseado em conhecimento," Universidade do Minho, Tese de Mestrado 1999.
- [37] J. Kim and et al, "Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste," *JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERING*, vol. 102, no. 4, pp. 328-332, 2006.
- [38] H. Gavala and et al, "Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature," *Water Research*, no. 37, pp. 4561-4572, 2003.
- [39] H. Bouallagui and et al, "Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste," *Process Biochemistry*, no. 39, pp. 2143-2148, 2004.
- [40] W. Parawira and et al, "A study of two-stage anaerobic digestion of solid potato waste using reactors under mesophilic and thermophilic conditions," *Environmental Technology*, vol. 28, pp. 1205-1216, 2007.
- [41] K. Meena and et al, "Anaerobic Technology Harnessed Fully by Using Different Techniques: Review," in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology CET*, Delhi, 2011.
- [42] L. Naik and et al, "Factors determining the stability and productivity of small scale anaerobic

- digesters," *Biomass and Bioenergy*, no. 70, pp. 51-57, 2014.
- [43] P. Weiland, "Biogas production: current state and perspectives," *Applied Microbiology and Biothechnology*, no. 85, pp. 849-860, 2010.
- [44] Santino Di Berardino, *Energia da biomassa*, 2015, Aulas de energia da biomassa lecionadas na FCUL.
- [45] A. Khalid and et al, "The anaerobic digestion of solid organic waste," *Waste Management*, no. 31, pp. 1737-1744, 2011.
- [46] V. Ferreira, *Contribuição para o estudo da modelação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos - Estudo da influência da geometria do reactor na cinética do processo*, Instituto Politécnico de Lisboa, Ed. Lisboa, Portugal: Edições Colibri, 2010, pp. 25-71.
- [47] R. Hickey and et al, "The effect of heavy metals on methane production and hydrogen and carbon monoxide levels during batch anaerobic sludge digestion," *Water Resource*, no. 23, pp. 207-218, 1989.
- [48] C. Jackson-Moss and J. Duncan, "The effect of the aluminium on anaerobic digestion," *Biotechnology Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 143-148, 1991.
- [49] M Alves, "ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS DE LEITO FIXO," Universidade do Minho, Tese de doutoramento 1998.
- [50] Y. Chen and et al, "Inhibition of anaerobic digestion process: A review," *Bioresource Technology*, no. 99, pp. 4044-4064, 2008.
- [51] T. Chen, P. Chynoweth, and R. Biljentina, "Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in a Nonmixed Solids Concentrating Digestor," *Biochemistry and Biotechnology*, vol. 24/25, pp. 533-544, 1990.
- [52] P. Kaparaju and et al, "Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies," *Bioresource Technology*, no. 99, pp. 4919-4928, 2007.
- [53] X. Gómez and et al, "Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate," *Renewable Energy*, no. 31, pp. 2017-2024, 2006.
- [54] (2015, Outubro) www.fluid-biogas.com. [Online]. <http://www.fluid-biogas.com/rukovodstvo/images/24.jpg>
- [55] Y Vögeli and et al, *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*, S Mercer, Ed. Dübendorf, Switzerland: Eawag - Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2014.
- [56] S. Ocwieja, "Life Cycle Thinking Assessment Applied to Three Biogas Projects in Central Uganda," MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Tese de Mestrado 2010.
- [57] F. Klingel and et al, *Fecal Sludge Management in Developing Countries. A planning manual.*, 1st ed. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology (EAWAG). Department for Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC), 2002.
- [58] W. Kossmann and et al, *Biogas Digest - Volume I*. Eschborn, Germany: German Agency for Technical Cooperation (GTZ).
- [59] J. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA publishing, 2003.
- [60] C. Müller, *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low - and Middle Income countries*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2007.
- [61] K. Rajendran and et al, "Household Biogas Digesters - A Review," *Energies*, vol. 5, pp. 2911-2942, 2012.
- [62] B. Eder and H. Schulz, *Biogas Praxis - Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele*,

- Wirtschaftlichkeit*. Staufeu: Ökobuch Magnum, 2007.
- [63] (2015, outubro) Web site from telegraph journal. [Online]. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/india/1485776/Cow-dung-becomes-a-cure-all-in-India.html>
- [64] A. Tiehm and et al, "Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization," *Water Research*, vol. 35, no. 8, pp. 2003-2009, 2001.
- [65] F. Monnet, "An introduction to anaerobic digestion of organic wastes," Remade Scotland, 2003.
- [66] A. Schnürer and A. Jarvis, "Microbiological Handbook for Biogas Plants," Swedish Waste Management U2009:03 Swedish Gas Centre Report 207, MalmöSweden, Sweden, 2010.
- [67] Celso Silva. (2016, janeiro) Web site de SlidePlayer. [Online]. <http://slideplayer.com.br/slide/49617/>
- [68] R. Deganutti and et al, "Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada," FAAC - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, SP,.
- [69] (2015, outubro) Website de Centro de Produções Técnicas. [Online]. <http://www.cpt.com.br/cursos-energiaalternativa/artigos/biodigestor-uma-implantacao-de-retorno-garantido>
- [70] Raúl Centro. (2016, janeiro) Web site de Biotecnología Práctica. [Online]. <https://bioreactorcrc.wordpress.com/2011/03/31/biodigestor-de-bajo-costos/>
- [71] GTZ/EnDev, "Installation manual for low-cost polyethylene tube digesters," Germany, Manual 2010.
- [72] B. Rittmann and P. McCarty, *Environmental biotechnology: Principles and applications*, International edition ed. Singapore: McGraw Hill, 2001.
- [73] (2015, outubro) Web site de infojardin. [Online]. <http://www.infojardin.com/foro/showthread.php?p=5918694>
- [74] A. Oliveira, Potencial de produção e utilização de biogás na avicultura comercial, 2001, Encontro de avicultores do estado de São Paulo, Jornada técnica, Anais do sindicato rural de Bastos, pag 16-28.
- [75] C. Machado, "BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DE BOVINOS LEITEIROS SUBMETIDOS A DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO AO AR," Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, Tese de mestrado 2011.